Teubners
Naturwissenschaftliche Bibliothek

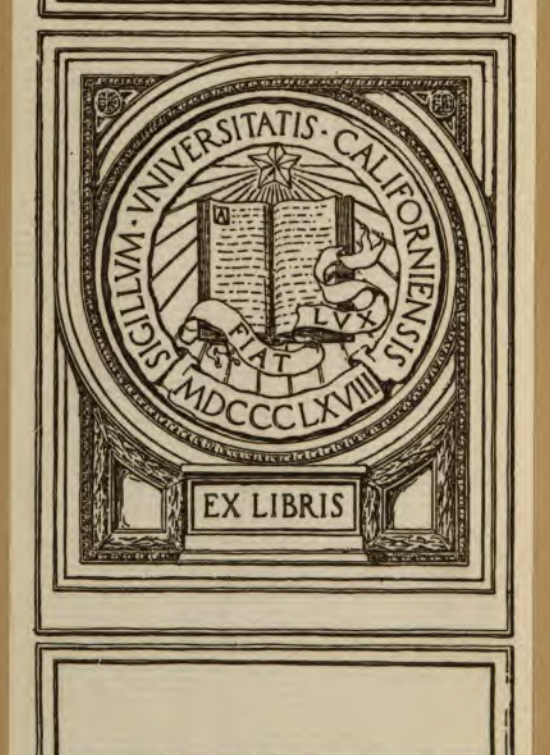
4

J. Keferstein

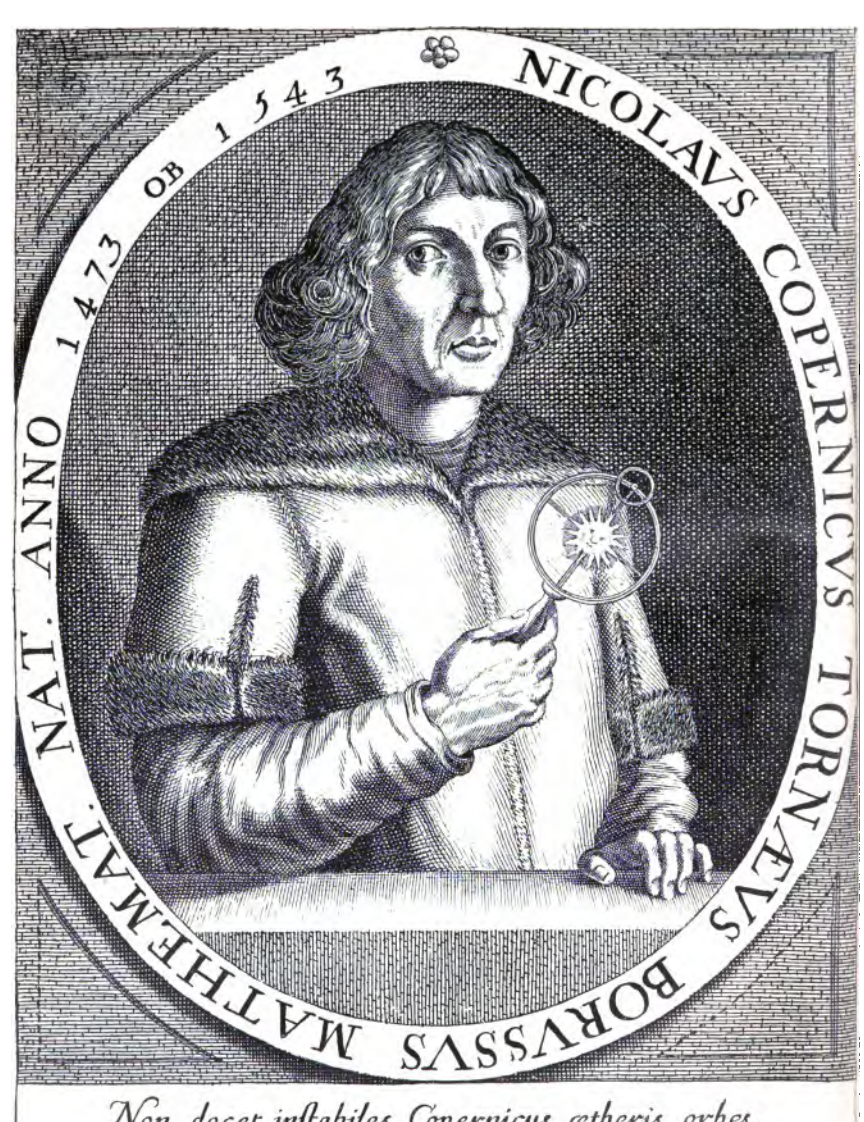
Große Physiker



Verlag v. B. G. Teubner in Leipzig und Berlin


IN MEMORIAM
FLORIAN CAJORI
SIGILLVM · VNIVERSITATIS · CALIFORNIENSIS
LVX
FIAT
MDCCCLXVIII
EX LIBRIS





Non docet instabiles Copernicus ætheris orbes,
Sed terræ instabiles arguit ille vices.

Nicolaus Coppernicus

Florian Cajori

Dr. Bastian Schmids naturwissenschaftliche Schülerbibliothek

4

Große Physiker

Bilder aus der Geschichte der Astronomie und Physik

Von

Dir. Prof. Dr. Hans Keferstein

in Hamburg

Für reife Schüler

Mit 12 Bildnissen auf Tafeln

BGT

Leipzig und Berlin
Druck und Verlag von B. G. Teubner
1911

Zur Einführung.

„Wer einmal mit einem oder einigen Männern ersten Ranges in Berührung gekommen ist, dessen geistiger Maßstab ist für das Leben verändert; zugleich ist solche Berührung das Interessanteste, was das Leben bieten kann." Ein gutes Geleitwort für unser Büchlein ist dieses Wort von Helmholtz. Mit einer Reihe erlauchter Geister sollen die jungen Leser hier engere Fühlung nehmen, als das im Schulunterrichte möglich ist. Auch diese großen Physiker sind Helden, denen die Wege zum Olymp sich nachzuarbeiten des Schweißes wert ist. Wohl läßt das umrissene kleine Gebiet erkennen, daß die Kultur ebensowenig Sprünge macht, wie die Natur, daß jeder Fortschritt sich in der Stille bei Vielen vorbereitet, daß die Wissenschaft nur durch die gemeinsame Arbeit der gebildeten Menschheit vorwärts gebracht werden kann. Aber an den entscheidenden Wendepunkten sind es doch einzelne hervorragende Männer, von denen die verstreuten Goldkörner zusammengeschmolzen, die halb unbewußt sich hervordrängenden neuen Gedanken klar erfaßt und geprägt werden. Erhellt ihnen dabei auch der Genius den dunklen Weg, so zeigt sich doch bei genauerem Zusehen deutlich, daß nur unermüdlicher Fleiß und harte Gedankenarbeit zum ruhmvollen Ziele führen. Darum braucht keiner meiner jungen Leser daran zu verzagen, solchen Vorbildern nachzueifern.

Der Verfasser würde indessen auch schon zufrieden sein, wenn der durch diese Schrift vermittelte Besuch in

der Geisteswerkstatt hochberühmter Physiker den Gesichtskreis der Teilnehmer erweiterte und bei ihnen das Interesse für die Physik durch Erzeugung einer warmen persönlichen Anteilnahme an der wissenschaftlichen Forschung ihrer bedeutendsten Förderer zu tätiger Liebe steigerte. Die vom Herrn Verleger dem Buche in dankenswerter Weise beigegebenen Bildnisse werden sich dann beleben, und aufs neue mag staunend der Schüler dem Lehrer in das vom Lichte der Wahrheit verklärte Auge schauen.

Hamburg, im Januar 1911.

Hans Keferstein.

Inhaltsverzeichnis.



1. Coppernicus.

Wer philosophieren will,
muß freien Geistes sein.
(δεῖ δὲ ἐλευθερὸν εἶναι
τῇ γνώμῃ τὸν μέλλοντα φιλοσοφεῖν.)
Alcinous.

Frühzeitig mußte der gestirnte Himmel die Aufmerksamkeit des aufrecht auf die Erde gestellten Menschen fesseln. Die Licht und Wärme spendende Sonne, der mild glänzende Mond mit seinen wechselnden Gestalten, das Heer der unzähligen funkelnden Sterne verknüpfte er durch Mythe und Dichtung mit seinem Hoffen und Wünschen, mit seinem Bangen und Fürchten, mit seinem Sehnen und Lieben. Hinaus über das Endliche in das Unendliche fühlte er sich gehoben und entrückt durch das dort Geschaute. Frei konnte hier die Phantasie in nie gehemmtem Fluge ihre Schwingen entfalten. Frei, nicht zügellos! Als das Aufmerken begann, sich in ein Beobachten zu wandeln, offenbarte sich eine wunderbare Ordnung nach Maß und Zahl. Die musikalische Harmonie, dieses Zusammenschmelzen einer Menge einzelner Töne zum Einklang, zu einem einheitlichen Gesamteindruck, fand dort ein erhabenes Ebenbild, vielleicht ihr Urbild! Die von der Einbildungskraft befruchtete wissenschaftliche Betrachtung bemühte sich, in Wesen und Sinn dieser himmlischen Harmonie einzudringen; als eine seltsame Mischung zunächst von phantastischen Spekulationen und nüchterner, geduldiger und ausdauernder Verfolgung und Messung der Bewegungen am Firmament entstand die Astronomie. Aus ihrem Ursprung wird ohne weiteres verständlich, daß in den ältesten Zeiten ihre Vertreter gleichzeitig die Priester des Volkes waren. Diese Personal-

union blieb auch noch im Mittelalter vielfach bestehen; die Berechnung des Festkalenders, der sogenannte Computus, namentlich die Bestimmung des Ostertermins, gehörte zu den Obliegenheiten des Klerus, in den seiner Heranbildung dienenden Klosterschulen wurde daher die Astronomie in eingehender Weise betrieben.

Die für die Ordnung priesterlicher Verrichtungen wie für die Regelung des gesamten bürgerlichen Geschäfts- und Verkehrslebens gleichwichtige Aufgabe genauer Zeitbestimmungen und der Herstellung von Kalendern nötigte die Astronomen zu gewissen Vorausberechnungen, z. B. des Eintretens bestimmter Stellungen der Sonne unter den Fixsternen oder des Neumondes und Vollmondes. Hier ergab sich nun aber eine große Schwierigkeit. Gerade der Lauf jener beiden für uns hervorragend wichtigen Gestirne läßt den immer gleichförmigen Gang der, die Grundlage aller Zeitmessung bildenden, Drehung des Fixsternhimmels vermissen, und als noch viel regelloser stellt sich auf den ersten Anblick die Bewegung der Planeten dar. Da aber doch auch in diesem scheinbar unregelmäßigen Verhalten eine periodische Wiederkehr der Erscheinungen durch die Beobachtungen mit Sicherheit festzustellen war, hatte die Entdeckung einer festen Regel und damit die Möglichkeit der Voraussage aller Vorgänge von vornherein die Wahrscheinlichkeit für sich.

Unter den hierauf gerichteten Versuchen des Altertums ist das Weltsystem des Claudius Ptolemaeus (150 n. Chr.), das im ganzen Mittelalter herrschend blieb, zu besonderer Berühmtheit gelangt. Er dachte sich, wie die Mehrzahl seiner Vorgänger, die Erde im Mittelpunkt des Weltalls. Aus der geringeren oder größeren Umlaufszeit von Sonne und Mond und der damals bekannten fünf Planeten wurde auf ihren kleineren oder größeren Abstand von der Erde

geschlossen; demgemäß stellte sich Ptolemaeus innerhalb einer Sphäre des Fixsternhimmels sieben Sphären vor, auf denen sich, von der Erde nach außen hin gerechnet, Mond, Merkur, Venus, Sonne ,Mars, Jupiter, Saturn bewegen sollten und zwar so, daß jeder Planet einerseits an der allgemeinen täglichen Bewegung des ganzen Himmels von Ost nach West teilnehme, zugleich aber noch einer besonderen eigenen Bewegung in entgegengesetzter Richtung von West nach Ost unterworfen sei. Die auf dieser Grundlage fußenden Vorausberechnungen wichen aber oft ganz erheblich von den Ergebnissen der wirklichen Beobachtungen ab. Man gibt eine wissenschaftliche Hypothese nicht sofort auf, weil sich einzelne Erscheinungen ihr nicht fügen; man sucht vielmehr durch Abändern und Ergänzen die zugrunde liegende Annahme in Übereinstimmung mit der Erfahrung zu bringen. Erst wenn die fortschreitende Vermehrung und Verfeinerung der Beobachtungsergebnisse zu immer neuen Hilfshypothesen zwingt, läßt sich die zumeist konservativ gesinnte Wissenschaft zur Aufgabe des alten Baues und zur Aufführung eines neuen geneigt finden. Auch das Ptolemaeische System mußte sich zahlreiche An- und Einbauten gefallen lassen, ehe man die Notwendigkeit begriff, es zu verlassen. Eine nach unserer heutigen Einsicht vorgefaßte Meinung, die aber in jener Zeit als unerschütterliche Grundwahrheit ,als Axiom galt, beherrschte alle diese Konstruktionen. Die eine Hälfte dieser Ansicht haben wir in unserem Trägheitsgesetze festgehalten, daß nämlich jeder Körper im Zustande gleichförmiger Bewegung beharre, wenn er nicht durch äußere Ursachen gezwungen wird, diesen Zustand aufzugeben, die andere haben wir in eben diesem Gesetze durch den Zusatz beseitigt, daß eine solche Bewegung stets geradlinig erfolge. Dem Altertum erschien unter Führung des Aristoteles als die eigentlich natürliche, einem Körper von

selbst zukommende und gleichzeitig vollkommenste Bewegung die Kreisbewegung mit gleichförmiger Geschwindigkeit, und das Bestreben der Wissenschaft richtete sich dementsprechend damals darauf, die beobachteten Abweichungen des Planetenlaufs auf dieses Bewegungsideal zurückzuführen. Um die Ungleichförmigkeiten in der Bewegung z. B. der Sonne von solchem Standpunkte aus zu erklären, nahmen die Nachfolger des Ptolemaeus eine exzentrische Stellung der Erde in der Kreisbahn der Sonne an. Gleiche von der Sonne zurückgelegte Bogen mußten dann von der Erde aus bei Sonnennähe (Perigaeum) unter größerem Gesichtswinkel erscheinen als bei Sonnenferne (Apogaeum). Die verwickelten Bahnen und Geschwindigkeiten der Planeten ließen sich in Kreisbewegungen mit gleichförmiger Geschwindigkeit zerlegen, indem man voraussetzte, daß der Planet eine Kreisbahn (den Epizykel) zurücklege, deren Mittelpunkt auf einem zweiten Kreise fortschreite. Die Ergebnisse der immer mehr vervollkommneten Beobachtungsmethoden zwangen indessen zu einer weitergehenden Zerlegung der dem Auge sich darbietenden Bewegungen, immer größer wurde die Anzahl der Krücken, mit denen sich diese Epizyklentheorie mühsam auf den Beinen erhielt. Sie zog nur noch Kraft aus dem ihr zugrunde liegenden Prinzip, aus der immerhin noch großen Ungenauigkeit der Beobachtungsergebnisse und nicht zum wenigsten aus der von den Griechen überkommenen mangelhaften begrifflichen Durcharbeitung der Erfahrung. Es waren wohl, um mit Kants Kritik der reinen Vernunft zu reden, Anschauungen da, aber ohne Begriffe und daher blind, es fehlte auch nicht an Begriffen, aber sie waren ohne Anschauung und daher leer. Die Griechen und ihre nächsten Nachfolger begnügten sich, ohne sich darüber Rechenschaft abzulegen, mit dem, was uns, als bewußte Forderung für die Dar-

stellung der Mechanik in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts von dem großen Physiker Kirchhoff ausgesprochen, fast wie ein atavistischer Rückschlag erscheint, — mit der bloßen Beschreibung der Wirklichkeit; dem Warum schenkten sie keine oder nur eine ganz oberflächliche Aufmerksamkeit. Ihr reicher Besitz an fein durchdachten Begriffen entstammte fast ausschließlich ihrem eigenen regen Innenleben und erwies sich infolgedessen als unzureichend zur Erfassung der Außenwelt. Erst der Anbruch der Neuzeit brachte mit der Herausbildung der Erfahrungsbegriffe, zunächst namentlich des Kraftbegriffes, in dieser Beziehung einen gründlichen Umschwung hervor.

Daß die Vertreter der Epizyklenlehre, wenigstens gegen Ausgang des Mittelalters, nicht daran dachten, für ihre Hypothese irgendwelche reale Existenz in Anspruch zu nehmen, geht recht deutlich aus der von Osiander dem Hauptwerke des Coppernicus auf eigene Faust beigegebenen und durchaus nicht im Sinne von Coppernicus gehaltenen Vorrede hervor. Dort heißt es: „Genugsam bekannt ist ja, daß die Astronomie die Ursache der anscheinend ungleichmäßigen Bewegungen schlechterdings nicht kennt. Wenn die Wissenschaft aber dergleichen hypothetisch ersinnt — und sie hat solche Hypothesen wirklich in großer Zahl ersonnen —, so ersinnt sie dieselben keineswegs mit dem Anspruche, irgend jemand zu überreden, daß die Sache sich wirklich so verhalte; es soll eben nur eine richtige Grundlage für die Rechnung aufgestellt werden.“ Und noch einmal am Schlusse: „Übrigens möge niemand in betreff der Hypothesen Gewißheit von der Astronomie erwarten. Sie vermag diese nicht zu geben. Wer das, was zu einem anderen Zwecke ersonnen ist, für Wahrheit nimmt, dürfte wohl unwissender von dieser Wissenschaft fortgehn, als er zu ihr gekommen ist.“

Aber wenn auch der mathematische Verstand allenfalls bereit war, sich weiter mit den exzentrischen Kreisen und Epizyklen abzufinden, und zu behelfen, so sträubte sich das gesunde Gefühl für Einfachheit und Schönheit immer mehr, auf diesem Wege weiter zu schreiten. Unwillkürlich drängen sich beim Blick auf die Herkulesarbeit der scharfsinnigen Rechner Goethes Verse auf die Lippen: „Weh! weh! du hast sie zerstört die schöne Welt, mit mächtiger Faust; sie stürzt, sie zerfällt! Ein Halbgott hat sie zerschlagen! Wir tragen die Trümmer in Nichts hinüber, und klagen über die verlorene Schöne. Mächtiger der Erdensöhne, prächtiger baue sie wieder auf!"

Nicolaus Coppernicus oder Koppernigk (geb. zu Thorn 1473, gestorben zu Frauenburg 1543) wurde der Baumeister eines neuen Kosmos. Zu hervorragender Begabung, die nimmer rastendem Fleiße die schönsten Früchte schenkte, gesellte sich für Coppernicus eine seltene Gunst der äußeren Lebensverhältnisse, der zeitlichen und örtlichen Beziehungen, in die ihn das Schicksal hineingestellt hatte. Er war der Sohn einer wohlhabenden Familie; sein Onkel Lucas von Watzelrode, der mit großer Treue für den früh des Vaters beraubten Knaben sorgte, herrschte als Bischof fast wie ein souveräner Fürst in Ermland, die nächsten Verwandten gehörten zu den regierenden Geschlechtern in den reichen Weichselstädten. Der Kampf mit der Not des Lebens blieb ihm durchaus erspart; eine vorübergehende Geldverlegenheit auf der Universität Bologna wird genau dieselben Ursachen gehabt haben wie ähnliche Zustände bei Musensöhnen unserer Tage, denen ein guter Wechsel nicht fehlt. Durch die einflußreiche Verwendung des Onkels Bischof erhielt Coppernicus bereits 1497 ein erledigtes ermländisches Kanonikat, dessen Besitz ihn aller Zukunftssorgen enthob, ihm nur geringe amtliche Pflichten auferlegte, dabei aber doch einen

nahen Verkehr mit den geistig regen Mitgliedern des ermländischen Hochstiftes und einen tiefen Einblick wie persönliches Eingreifen in die sozialen und staatlichen Verhältnisse Ermlands, ja selbst in die umfassende Politik der größeren Nachbarstaaten vermittelte.

Gerade das engere Heimatland des Coppernicus zeigte bei seinen Lebzeiten eine bunte Musterkarte der verschiedenartigsten Lebensströmungen und Interessen. Der gegen die eingesessene Bevölkerung herrisch sich abschließende deutsche Ritterorden, der eigentlich nur noch als anständige Unterkunft der unversorgten Söhne deutscher Adelsgeschlechter eine zweifelhafte Existenzberechtigung hatte und schon in Abhängigkeit vom Königreich Polen geraten war, die über ihre Rechte eifersüchtig wachenden, kraftvoll aufblühenden Städte mit ihren weit- und freiblickenden Kaufherren, die welt- und lebensklugen Stiftsherren, die doch nur an der Zwietracht ihrer Gegner und deren Inanspruchnahme durch mächtigere Feinde einen kurzfristigen Halt für ihre Unabhängigkeit zu finden vermochten — alle diese verschiedenen Elemente kämpften auf ermländischem Grund und Boden um Dasein und Geltung. Der junge Kanonikus fand hier reiche Gelegenheit, zu einer großzügigen Beurteilung menschlichen Treibens und Strebens zu gelangen; die Verengerung des Sinns im engen Kreise lag hier weit ab.

Auch der ganze Bildungsgang des Coppernicus war der Befreiung des Geistes von Vorurteil und Autoritätsglauben höchst günstig. Wohlstand der Seinigen ermöglichte ihm nicht nur den Erwerb eines sehr umfassenden und tiefgründigen Wissens — er studierte Mathematik und Astronomie, Philosophie, kanonisches Recht und Medizin, er beherrschte die lateinische Sprache musterhaft und gehörte zu den wenigen Gelehrten seiner Zeit, denen das Griechische nicht fremd blieb —,

er vermittelte ihm auch die Bekanntschaft mit fremden Ländern und deren Zuständen. Die Studien- und Wanderjahre führten Coppernicus weit hinaus über die nachbarliche Universität Krakau nach Nürnberg, das seit dem Wirken Regiomontans in seinen Mauern der Mittelpunkt der mathematischen Studien in Deutschland geworden war und zugleich als eine Heimstätte der Präzisionsmechanik galt, und über die Alpen hinweg nach der weltberühmten Hochschule Bolognas, nach Padua, Ferrara und Rom.

Und welche Fülle befruchtender Ideen, welch ungeahnte Erweiterung des Horizonts der Menschheit, welch herrliche Erzeugnisse künstlerischen Schaffens brachte die Zeit hervor, in der Coppernicus das Glück zu leben hatte. Mit flammendem, wahrhaft apostolischem Eifer breiteten die Humanisten vor der aufhorchenden Jugend ihre Schätze aus, die Briefe der Dunkelmänner (epistolae obscurorum virorum 1515—1517) trafen die Scholastik wie mit einem Peitschenhieb; Savonarolas Ruhm stand im Zenith, als Coppernicus Italiens Boden betrat, Luther war nur zehn Jahre jünger als er und überlebte ihn nicht mehr als drei Jahre; die ungeheure Aufregung der Geister durch die Reformation fiel ganz in die Lebenszeit des Coppernicus hinein. Den Einundzwanzigjährigen erreichte die Kunde von der ersten großen Fahrt des Columbus nach dem Westen, und in der reifen Höhe seines Lebens folgten sich die großen geographischen Entdeckungen Schlag auf Schlag. In Rom, wo Coppernicus das Jubeljahr 1500 verbrachte, schuf Michelangelo unsterbliche Werke, ein Bramante, ein Raffael lebten um dieselbe Zeit.

Als ein würdiges Mitglied gesellt sich Coppernicus selbst dieser Gemeinde erlesener Geister. Der leitende Gedanke seiner Reformation der Astronomie ist heutzutage jedem Knaben geläufig; „die beobachteten Bewegungen nicht in

den Gegenständen des Himmels, sondern in ihrem Zuschauer zu suchen", erscheint kaum noch irgend jemandem als „widersinnische" (Kant) Art der Betrachtung. Aber einst war sie ein Wagnis. Eine mehr als tausendjährige Überlieferung, die Autorität der Bibel und der Sinnenschein sprachen gleichermaßen dagegen. Luther hielt die neue Lehre für eine Ausgeburt prahlerischer Neuerungssucht und sagte von Coppernicus: „Der Narr will die ganze Kunst Astronomiä umkehren!", und der hochgelehrte Melanchthon bezeichnete die Lehre des sarmatischen Astronomen, der die Erde bewegt und die Sonne festheftet, als ein absurdes Ding, und fügte den Wunsch hinzu, weise Staatenlenker sollten solche Ausschweifung der Geister im Zaum halten. Kaspar Peucer, Melanchthons Schwiegersohn, meinte verhältnismäßig milde: in Coperniceis hypothesibus absurditas offendit, aliena a vero, man fühlt sich durch die von der Wahrheit weit abliegende Verkehrtheit der Coppernicanischen Hypothesen vor den Kopf gestoßen. Eine derbe Fastnachtsposse des Magisters Gnapheus in Elbing gab die Ideen des Coppernicus dem spöttischen Gelächter der Masse preis.

Solche Ausfälle erfolgten, als das Coppernicanische Weltsystem nur erst durch mündliche Verbreitung bekannt geworden war; sein Urheber mochte den Ausbruch eines Gewittersturmes voraussehen, wenn eine Veröffentlichung durch Druck die Aufregung und den Streit über das Für und Wider in die weitesten Kreise trug. Coppernicus war keine Kampfnatur wie Luther, auch hielt er den großen Haufen nicht für das geeignete Forum zur Entscheidung tiefgreifender wissenschaftlicher Fragen und erwog lange, „ob es nicht vielmehr besser sei, dem Beispiel der Pythagoräer und einiger anderer zu folgen, welche, wie der Brief des Lysis an Hipparch bezeugt, nicht schriftlich, sondern münd-

lich, und lediglich ihren Angehörigen und Freunden, die Mysterien der Philosophie zu überliefern pflegten" (aus der Widmung des Werkes de revolutionibus an Papst Paul III). Es bedurfte lang fortgesetzten energischen Zuredens, namentlich seines Freundes Tiedemann Giese, Bischofs von Kulm, und seines Schülers und begeisterten Verehrers Joachim Rheticus, um ihm die Erlaubnis zur Drucklegung des großen Werkes „Über die Umwälzungen der Weltkörper" (De revolutionibus orbium caelestium = Über die Kreisbewegungen der Himmelsbahnen in Osianders Fassung) abzugewinnen, nachdem er es 36 Jahre zurückgehalten hatte. Bekanntlich ward dem Verfasser das erste vollständige Exemplar des Buches erst an seinem Todestage überbracht, in besonderem Sinne wurde für ihn „das Ende des Lebens der Anfang der Unsterblichkeit". Eine von Coppernicus in den dreißiger Jahren des Jahrhunderts 15 niedergeschriebene Abhandlung, der wohl von fremder Hand der Titel Nicolai Copernici de hypothesibus motuum coelestium a se constitutis commentariolus vorgesetzt wurde, war jedenfalls nur zur Verbreitung im gelehrten Freundeskreise bestimmt.

Bei der Darlegung seiner kosmischen Ideen wies er übrigens stets mit Entschiedenheit auf seine Abhängigkeit von seinen großen Vorgängern, den babylonischen, griechischen, arabischen und spanischen Astronomen hin, deren Beobachtungen er gründlich kannte und mit bewundernswertem Geschick zu verwerten verstand. In der bereits erwähnten Widmung erzählt er, daß er durch einen Bericht des Cicero über die Behauptung des Nicetas (richtig: Hicetas) von der Erdbewegung und eine Stelle im Plutarch, die ähnliche Ansichten einiger Pythogaräer mitteilt, zur Aufstellung seines Systems den Anstoß erhalten habe. Der in sozialer und politischer Tätigkeit geschulte Mann erkannte

wohl deutlich, wie wichtig für die Einführung und dauernde Festlegung einer Neuerung ihre historische Verknüpfung mit dem Überlieferten ist.

Vom rein formalen mathematischen Standpunkte aus erscheint nun in der Tat die Grundansicht des Coppernicus gar nicht so umwälzend, wie sie weiterhin wirkte. Er hat nach der Sprache der analytischen Geometrie, bei der Beschreibung der Bewegungen am Himmel den Übergang von einem in und mit der Erde festgelegten Koordinatensystem zu einem mit der Erde bewegten bzw. in der Sonne festliegenden Koordinatensystem vollzogen. So wird die Sache auch in der untergeschobenen Vorrede Osianders und sogar von Coppernicus selbst in einem Satze der „Widmung" dargestellt, wo er sagt: „Obschon diese Annahme (von der Erdbewegung) widersinnig schien, so glaubte ich doch, weil ich wußte, daß andern vor mir diese Freiheit zugestanden war, beliebige Kreise anzunehmen, um die Erscheinungen am Himmel zu erklären — es werde auch mir gestattet werden, zu versuchen, ob nicht durch die Annahme einer Bewegung der Erde genügendere Erklärungen als die bisherigen für die Umwälzung der Himmelskörper aufgefunden werden können." Aber Coppernicus erkannte sehr wohl, daß dieser Koordinatenumformung neben der formalen eine sehr reale Bedeutung innewohne. — Die eigene Beobachtung, die sonst den Naturforscher vorwärts treibt und oft fast gegen seinen Willen auf neue Pfade drängt, spielte bei Coppernicus eine verhältnismäßig untergeordnete Rolle. Obwohl er in der Lage war, sich feinere Meßapparate zu beschaffen, begnügte er sich mit selbstverfertigten, roh aus Fichtenholz gearbeiteten, ganz einfachen Instrumenten, deren Teilstriche mit Tinte gezogen waren. Er erklärte sich für hocherfreut, wenn es ihm gelänge, seine Ermittelunzen bis auf zehn Minuten der Wahrheit nahe zu führen,

und blieb sich der Unzulänglichkeit seiner Beobachtungsergebnisse klar bewußt. Nur 27 eigene Beobachtungen hat er seinem Hauptwerke einverleibt, sie hatten für ihn wesentlich den Zweck, durch Vergleichung mit den älteren Angaben, die inzwischen am Himmel erfolgten Veränderungen zu erkennen. Trotzdem war er ein durchaus induktiv verfahrender Naturforscher. Das bis in seine äußersten Konsequenzen entwickelte Ptolemaeische System überschaute er vollkommen; er erkannte, daß die zur Erklärung der Ungleichheiten in den Planetenbahnen ersonnenen Epizykel den ungleichförmigen Lauf der Sonne auf das deutlichste widerspiegelten, ein innerer Zusammenhang also höchst wahrscheinlich vorhanden war, und musterhaft verstand er die überlieferten Beobachtungen zu deuten und aus ihnen und auf ihnen seinen Neubau fest zu begründen. In erster Linie aber war es ein ästhetischer Gesichtspunkt und eine philosophische Überzeugung, die ihn zur Preisgabe des Ptolemaeischen Systems führte. Fest hielt er an dem lediglich auf Vernunftgründe gestützten Axiom, daß jede Bewegung am Himmel eine gleichförmige Kreisbewegung sein oder aus solchen Bewegungen sich zusammensetzen lassen müsse. „Der Kreis kann allein das Vergangene zurückführen", es ist „unwürdig", „Unbeständigkeit in der Natur des Bewegenden" oder eine „Ungleichheit des bewegten Körpers" „bei demjenigen anzunehmen, welches nach der besten Ordnung eingerichtet ist" (De rev. I 4). Dieses Axiom, von dem das Ptolemaeische System beherrscht wurde, war von seinen Nachfolgern unter dem Druck der Notwendigkeit, die Rechnung in bessere Übereinstimmung mit der Wirklichkeit zu bringen, in bezug auf das Festhalten an der Gleichförmigkeit der Bewegungen durchbrochen worden; es fehlte daher dem zur Zeit des Coppernicus herrschenden astronomischen System ein einheitlicher, mit aller Strenge

durchgeführter Grundgedanke. Eine weitere Folge davon war nach des Coppernicus eigenen Worten, daß die Vertreter des geozentrischen Systems „die Hauptsache, die Gestalt des Weltalls und eine bestimmte Symmetrie seiner Teile, nicht zu finden oder aus jenen Kreisen herzuleiten vermochten." Erst dieser Gesichtspunkt, die feste Zuversicht, daß das vom allerbesten und allervollkommensten Baumeister für uns in schönster Ordnung aufgestellte und durch göttliche Weisheit geleitete Weltall in seiner einfachen erhabenen Schönheit dem Menschen auch begreiflich sein, daß der Mensch den Schöpfergedanken nachzudenken befähigt sein müsse, erhebt die Coppernicanische Reform der Astronomie zu ihrer welt- und wissenschaftsgeschichtlichen Bedeutung. Als Hypothese entstanden und als solche zunächst hingestellt und geprüft, verwandelte sich die Lehre von der Erdbewegung ihm auf Grund der Ergebnisse langjähriger, sorgfältiger Untersuchungen in eine Wirklichkeit, in eine harmonische Ordnung der Reihenfolge und Größe der Gestirne, all ihrer Bahnen und des Himmels selbst, derzufolge „in keinem Teile ohne Verwirrung der übrigen Teile und des ganzen Universum irgend etwas umgestellt werden könne" (Widmung). Das formale Bedürfnis einfacher Beschreibung und sicherer Vorausberechnung der Erscheinungen tritt vor dem Streben, die Gedanken der Wirklichkeit anzupassen, in den Hintergrund. Coppernicus machte aus einem geistreichen Einfall der Pythagoräer und anderer Denker des Altertums durch gründliche Prüfung aller aus ihm fließenden Folgerungen und den Nachweis von deren Übereinstimmung mit den bekannten Erfahrungstatsachen ein System, das in seiner Einfachheit, Folgerichtigkeit, Natürlichkeit schließlich jedermann als eine zutreffende Darstellung der Natur selbst erscheinen mußte. Nicht der hat ein verbrieftes Eigentumsrecht an einem gescheiten Ge-

danken, der ihn zuerst gelegentlich hinwirft, sondern wer ihn gründlich durchdenkt, in alle seine Verzweigungen verfolgt und das Ergebnis in einer Form darstellt, die eine Nachprüfung möglich macht.

Erst aus der Anerkennung des Coppernicanischen Weltsystems als eines die Wirklichkeit richtig wiedergebenden Aufbaus erwuchs der weiterschreitenden Wissenschaft die Aufgabe, über den Nachweis des Tatsachenbestandes fortzuschreiten zum Versuche der Begründung seiner Notwendigkeit.

Das durch Menzzers Übersetzung bequem zugänglich gemachte Hauptwerk des Coppernicus zerfällt in 6 Bücher. Im ersten Buche werden die neuen Ansichten zunächst nur als überhaupt möglich und zulässig auseinandergesetzt, und ihre Vorzüge vor der herrschenden Meinung durch logische und ästhetische Überlegungen dargetan. Wiederholt macht Coppernicus geltend, es liege doch näher anzunehmen, daß der kleine Teil der Welt, die Erde, sich in 24 Stunden im Raume bewege als das ganze unermeßliche All. Viele der hier ins Feld geführten Gründe muten uns freilich noch recht aristotelisch-scholastisch an, so z. B. daß die geradlinige Bewegung nur eintrete, „wenn die Dinge sich nicht richtig verhalten und nicht vollkommen ihrer Natur gemäß sind"; „die kreisförmige Bewegung verläuft immer gleichmäßig, weil sie eine nicht nachlassende Ursache hat" (Kap. 8), während anderseits eine vorahnende Vorwegnahme viel späterer Erkenntnisse, das Vorhandensein der Schwere auch auf Sonne, Mond und Planeten nicht in Abrede stellen möchte, die Schwere genommen „als ein von der göttlichen Vorsehung des Weltenmeisters den Teilen eingepflanztes, natürliches Streben, vermöge dessen sie dadurch, daß sie sich zur Form einer Kugel zusammenschließen, ihre Einheit und Ganzheit bilden" (Kap. 9). Dem 10. Kapitel ist die

Figur beigegeben, die das Schema des neuen Weltsystems enthält. 9 konzentrische Kreise, am äußersten steht I. Stellarum fixarum sphaera immobilis (die unbewegliche Sphäre der Fixsterne) II. Saturnus annos XXX revolvitur (Saturn vollendet seinen Umlauf in 30 Jahren). III. Jovis XII annorum revolutio IV. Martis bima revolutio. V. Telluris cum orbe Lunari annua revolvitur (hier sind zu dem Kreise für die Bewegung des Erdmittelpunktes noch die beiden Kreise hinzugezeichnet, innerhalb deren der Umlauf des Mondes erfolgt). VI. Venus noni mestris. VII. Mercurii LXXX dierum. „In der Mitte aber von allem steht die Sonne. Denn wer möchte in diesem schönsten Tempel diese Leuchte an einen andern oder bessern Ort setzen, als von wo aus sie das Ganze zugleich erleuchten kann?" „So lenkt in der Tat die Sonne, auf dem königlichen Throne sitzend, die sie umkreisende Familie der Gestirne. Wir finden also in dieser Anordnung eine bewunderungswürdige Harmonie der Welt, und einen zuverlässigen, harmonischen Zusammenhang der Bewegung und Größe der Bahnen, wie er anderweitig nicht gefunden werden kann." Im 11. Kapitel erläutert Coppernicus die dreifache Bewegung der Erde. Zu der täglichen Drehung der Erde um ihre Achse von West nach Ost und der jährlichen rechtläufigen Bewegung ihres Mittelpunktes von West nach Ost im Tierkreis meint er nämlich noch die von ihm sogenannte Bewegung der Deklination, ebenfalls im jährlichen Kreislauf, aber rückläufig hinzunehmen zu müssen. Man kann sich die zugrunde liegende Anschauung, wenn man einmal von der täglichen Drehung der Erde absieht, am besten an der Bewegung der Pferde eines Karussels klar machen. Vom unbewegten Mittelpunkte aus betrachtet drehen sich die Pferde nicht um ihre senkrechte Achse, während sie für einen Beobachter draußen im Raume bei jedem Umlaufe eine ganze derartige

Drehung, turnerisch gesprochen „eine volle Wendung“ ausführen. Soll umgekehrt ein Karusselpferd während eines Umlaufs die Nase immer nach derselben Himmelsrichtung, z. B. Norden, behalten, also für einen Beobachter draußen im Raume keine Drehung um seine Achse ausführen, so muß es sich für einen im Mittelpunkt des Karussels stehenden Zuschauer bei einem Umlauf gerade einmal um seine Achse drehen, und zwar im Sinne der Uhrzeigerbewegung, wenn das Karussel sich gegen den Sinn des Uhrzeigers bewegt. Die „Bewegung der Deklination“ beschreibt also die Erscheinung, die wir heutzutage als Unveränderlichkeit der Richtung der Erdachse im Raume aufzufassen und als solche aus allgemeinen mechanischen Gesetzen zu erklären gewöhnt sind.

Diese dem Coppernicus ganz eigentümliche Idee führt uns nach einem Vortrag des bekannten Berliner Astronomen W. Förster recht eigentlich in das Quellgebiet des Coppernicanischen Gedankenkreises, und wir treten hier gleichzeitig an eine Lehre heran, die für die Annahme des neuen Systems durch die Anhänger an den Mechanismus des Ptolemaeischen Systems — ein solcher blieb im wesentlichen ja auch Coppernicus selbst — von entscheidender Bedeutung war. Die alten Astronomen stellten sich zwischen Zentralgestirn und dem es umkreisenden Sterne eine Art starrer Verbindung vor; eine etwaige Bewegung der Erde um die Sonne vermochten sie sich mechanisch begreiflich zunächst nur unter der Voraussetzung zu machen, daß die Erdachse der Verbindungslinie der Pole der Ekliptik dauernd parallel blieb, also der Himmelspol einen Parallelkreis zur Ekliptik beschrieb. Der Lauf des Mondes um die Erde, bei dem er dieser immer dasselbe „Gesicht“ zukehrt, schien die Richtigkeit dieser Auffassung deutlich zu bestätigen. Das Nichtvorhandensein jenes zu fordernden Parallelismus mag ein Hauptgrund dafür ge-

wesen sein, daß die Lehre des Aristarch von Samos (um 264 v. Chr.) von der doppelten Bewegung der Erde, der täglichen und der jährlichen, keine ernstliche Beachtung zu gewinnen vermochte. Die einzige Möglichkeit, demgegenüber dem heliozentrischen Standpunkt Geltung zu verschaffen, lag in dem Nachweise, daß triftige Gründe für die Annahme einer Beweglichkeit der Erdachse, oder, was dasselbe sagt, des Äquators sprechen. Es ist höchst merkwürdig, wie hier eine Vermischung von Wahrheit und Irrtum zu einem wertvollen Ergebnis geführt hat. Bekanntlich schneidet der zum Himmelsäquator erweiterte Erdgleicher die scheinbare jährliche Sonnenbahn, die Ekliptik, in 2 Punkten, die als die Äquinoktialpunkte, die Nachtgleichepunkte, bezeichnet werden, weil Tag und Nacht gleich lang sind, wenn die Sonne, am Frühlings- oder Herbstanfang in einem dieser Punkte stehend, bei der täglichen scheinbaren Drehung des Himmelsgewölbes den Himmelsäquator durchmißt. Nun hatte schon Hipparch um 150 v. Chr. bemerkt, daß die Nachtgleichen in längeren Zeiträumen ein wenig der Drehung des Fixsternhimmels vorausgehen. Da sie als unbedingt feste Punkte auf der Ekliptik betrachtet wurden, konnte dieses Vorausgehen nur durch eine entgegengesetzte Bewegung des Fixsternhimmels herbeigeführt sein. Hipparch spricht deshalb auch von einem Zurückbleiben der Nachtgleichen, während wir von einem Vorrücken (Praecession) reden. Zur Erklärung ließ man im Ptolemaeischen System um die 8. Sphäre des Fixsternhimmels sich noch eine mit ihr verbundene 9., deren Rotationsachse auf der Ekliptik senkrecht stehen sollte, entgegengesetzt der täglichen Drehung mit einer Geschwindigkeit drehen, vermöge deren in 100 Jahren 1° zurückgelegt wurde. Bis hierher scheint alles in bester Ordnung. Nun kommt aber der Treppenwitz, der auch in der Geschichte

der Wissenschaften nicht fehlt. Zur Zeit des Coppernicus lag ein über 1700 Jahre sich erstreckendes Beobachtungsmaterial zu der besprochenen Erscheinung vor, das als im wesentlichen zuverlässig galt; aus ihm ergab sich unwidersprechlich eine Unregelmäßigkeit der Präzession, mithin auch eine Ungleichheit des bürgerlichen tropischen Jahres, d. h. des Zeitraums zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen der Sonne durch dieselbe Nachtgleiche, z. B. des Frühlings. Das aber war für die, von der Kirche wegen des Ansatzes ihrer Feste und besonders wegen der Berechnung des Osterfestes längst als dringlich erkannte, Kalenderverbesserung ein sehr übler Umstand, wußte man doch durchaus nicht, welche der festgestellten verschiedenen Jahreslängen man dabei zugrunde legen sollte. Hier ergab sich eine Aufgabe des Schweißes der Edlen wert, und es ist wohl glaubhaft, daß auch Coppernicus frühzeitig den Entschluß faßte, seine Kraft an ihrer Lösung zu versuchen.

Zur Zeit des Coppernicus suchte man jener Unregelmäßigkeit durch die sogenannte Trepidationslehre Herr zu werden: An die „neunte Sphäre schloß sich . . eine zehnte hohle Kugelfläche an, welche die vorige bei ihrer Drehung begleitete. Zwei diametral sich entgegenstehende Punkte der Ekliptik aber waren nun die Mittelpunkte für zwei der zehnten Sphäre angehörige kleine Kugelkreise, auf denen sich die beiden Äquinoktialpunkte mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegten" (S. Günther nach Prowe). Dieses Gewirr war dem frühzeitig auf das Erfassen der einfachen Erhabenheit des Weltbaus gerichteten Geiste eines Coppernicus zu arg. Er zerriß das verschlungene Gewebe, indem er die Äquinoktialpunkte von der Ekliptik loslöste; in der Tat ergab sich sofort die Unveränderlichkeit des Jahres, wenn der Lauf der Sonne nicht auf jene Punkte, sondern auf bestimmte Fixsterne bezogen wurde. Durch die entschlossene

Anerkennung der Beweglichkeit der Äquinoktialpunkte wurde die ganze Trepidationslehre über den Haufen geworfen und zunächst die Bewegung der Fixsterne auf der neunten Sphäre als bloßer Schein hingestellt, dessen wahre Ursache in einer säkularen Schwankung, einer „Libration“ des Äquators, also der Erdachse, zu suchen sei. Die innere Unnatur und trotz aller Bemühungen doch nicht zu beseitigende Unzulänglichkeit der bisherigen Präzessionstheorie zur Erklärung der beobachteten Erscheinungen zwang zur Preisgabe der Unbeweglichkeit der Erdachse. Damit aber war sogleich der weitere Schritt nahegelegt, nicht nur die säkulare, sondern auch die tägliche Drehung des Fixsternhimmels als eine scheinbare zu erfassen und zu begründen; wenn die Libration der Erdachse eine notwendige Annahme war, konnten keine ernstlichen Einwände gegen ihre Begabung mit einer umfassenderen Bewegung, von der jene dann gewissermaßen nur einen Ausläufer bildete, erhoben werden. Die „Bewegung der Deklination“ hatte eine Grundlage erhalten, durch die sie nicht nur Coppernicus selbst, sondern auch seinen Fachgenossen wohl annehmbar werden mußte, und damit war nun eben zugleich eine befriedigende Erklärung für den befremdlichen Umstand gefunden, daß die Erdachse trotz der Drehung der Erde um die Sonne eine im wesentlichen unveränderte Richtung im Raume behielt. — Aber diese ganze Kette von wohlgefügten Schlußfolgerungen, an der zunächst die Lehre von der Erdbewegung hängt, ist aus falschen Voraussetzungen geschmiedet! Die Beobachtungen, aus denen Coppernicus, seine Vorgänger und Zeitgenossen die Unregelmäßigkeiten der Präzession und des tropischen Jahres ablasen, sind unrichtig; sie beruhen, wie Tycho de Brahe nach der Tat des Coppernicus nachgewiesen hat, auf für ihre Zeit unvermeidlichen Beobachtungsfehlern! Der eigentliche Witz liegt nun nicht so

sehr darin, daß hier aus falschen Prämissen eine Wahrheit hervorgegangen ist, — denn das heliozentrische System stützt sich doch wesentlich noch auf andere Überlegungen —, sondern daß das alte System selbst eine unrichtige Gedankenfolge geliefert hat, daß diese vom Gegner als richtig betrachtet und zu erfolgreichem Angriff benutzt wurde, und daß einer der Anhänger des Ptolemaeus, Tycho de Brahe, jene Unrichtigkeit nachwies, als der Sieg der neuen Lehre bereits als entschieden gelten konnte. — Die Untersuchungen des Coppernicus über das Vorrücken der Nachtgleichen und die Jahreslänge sind im 3. Buche de revolutionibus enthalten; bezeichnend für die Wichtigkeit, die man gerade ihnen damals beimaß, ist der Umstand, daß Joachim Rheticus in seiner narratio prima, dem 1540 an Schoner in Nürnberg gerichteten, aber für die größere Öffentlichkeit bestimmten, ersten Berichte über das neue Weltsystem, vorzugsweise über sie genauere Mitteilungen macht. Die Ergebnisse sind später neben den auf ihnen beruhenden Prutenischen Tafeln Reinholds der Gregorianischen Kalenderreform zugrunde gelegt worden.

Die nach unserer heutigen Auffassung besonders lebhaft zugunsten des heliozentrischen Systems sprechende Vereinfachung der Erklärung der verwickelten Planetenbahnen, des Wechsels zwischen Rechtläufigkeit, Stillstand und Rückläufigkeit bei Veränderlichkeit der Breite, d. h. des Abstandes der Wandelsterne von der Ekliptik, kommt in den beiden letzten Büchern des Hauptwerkes zur Besprechung. Ohne Epizykeln und exzentrische Kreise kommt allerdings Coppernicus hierbei ebensowenig wie bei der Beschreibung der scheinbaren Sonnenbewegung und der Mondbewegung zustande. Wenn er aber an den Nachweis im 15. Kapitel des 3. Buches, daß der Epizykel auf dem Hauptkreis und ein dem Hauptkreis gleicher exzentrischer Kreis, dessen Mittel-

punktsabstand von jenem gleich dem Radius des Epizykels ist, mathematisch gleich geeignet zur Erklärung der scheinbaren Ungleichheiten sind, die Bemerkung knüpft: „Welches von beiden am Himmel vorgehe,“ ist nicht leicht zu entscheiden, „außer wenn eine fortwährende Übereinstimmung der Resultate mit den Erscheinungen zwingt“ eins anzunehmen (ebenda und im 20. Kap.), so gewinnt man hieraus nicht den Eindruck, als ob Coppernicus seinen Beschreibungen der Bewegungen von Mond und Planeten einen gleichen Wirklichkeitsgrad beigemessen habe, wie seiner Behauptung von der täglichen und jährlichen Erdbewegung. Er konnte hier nur die größere Eleganz seiner Herleitungen rühmen. Seine Freude an der erreichten Einfachheit kommt am Schlusse des erwähnten Commentariolus, der die neue Lehre in Kürze ohne mathematische Begründung darstellt, zu lebhaftem Ausdruck: „Demnach bedarf die Merkur-Bahn einer Kombination von 7 Kreisen. Venus braucht deren 5, die Erde 3 und der sie umkreisende Mond 4, Mars, Jupiter und Saturn endlich je 5. Also genügen überhaupt 34 Kreise, um den ganzen Bau der Welt, den ganzen Reigentanz der Gestirne zu erklären.“

Im Gegensatze zu der ablehnenden Haltung der Reformatoren Luther und Melanchthon wurde der Leistung von Coppernicus in den Kreisen der römischen Hierarchie beim ersten Bekanntwerden wohlwollende Beachtung geschenkt. Seine nächsten Vorgesetzten, die Bischöfe von Ermland, legten ihm keine Hindernisse in den Weg, der Kardinal Nicolaus Schonberg bat ihn unter den ehrendsten Versicherungen in einem Briefe vom 1. November 1536 aus Rom um Abschriften seiner „Nachtarbeiten über den Bau der Welt“, Papst Clemens VII. ließ sich 1533 im Beisein von zwei Kardinälen und anderen Männern seiner Umgebung in den Vatikanischen Gärten von Widmannstad

einen eingehenden Vortrag auf Grund des Commentariolus über das neue Weltsystem halten, und das Hauptwerk durfte vom Verfasser Papst Paul III. zugeeignet werden. Die Erklärung dafür ist wohl ebensosehr in der freien weltmännischen Bildung der damaligen kirchlichen Würdenträger wie in dem Bedürfnis der Kalenderreform zu suchen, um derentwillen man jedem Fortschritte der Astronomie wohlwollende Aufmerksamkeit schenkte, wie denn auch Coppernicus bereits 1514 zur Abgabe eines diesbezüglichen Gutachtens für das Lateranische Konzil unter Leo X. aufgefordert worden war. 1616 freilich suspendierte ein Dekret der Index-Kongregation das Buch, bis es verbessert worden sei; erst 1757 wurden die Bücher, die die Coppernicanische Theorie lehrten, freigegeben, Galileis Dialog über die Weltsysteme sogar erst 1822, doch ohne daß eine Aufhebung oder Einschränkung der Bullen erfolgte, die verbieten, an die Bewegung der Erde zu glauben (nach Chamberlain). Selbst in die Kreise der Fachgelehrten vermochte sich die neue Lehre nur sehr allmählich Eingang zu verschaffen, woran freilich auch die Schwierigkeit des Studiums des Coppernicanischen Hauptwerkes Schuld trug; bezeichnet doch selbst ein Galilei das neue System als schwer verständlich, wenn auch einfach in der Anwendung (intellectu difficile et effectu facile). Für die praktischen Berechnungen der Astronomen verdrängten allerdings die auf des Coppernicus Arbeiten fußenden Prutenischen Tafeln bald die Alphonsinischen Tafeln des Ptolemaeischen Systems, aber das Bedürfnis, den Gedanken nachzugehen, aus denen jene Tabellen hervorgegangen waren, regte sich nur in den überragenden Geistern. Selbst ein Baco von Verulam noch nannte den Coppernicus einen verwegenen Mann, „welcher sich nicht scheute, alte begründete Anschauungen zu stürzen, wenn nur seine Rechnungen gut

stimmten." Gemeingut der Gebildeten dürfte das heliozentrische System kaum vor Beginn des Jahrhunderts 17 geworden sein. Aber die Vertreibung des Menschen aus dem Mittelpunkt der Welt, damit zugleich die Aufgabe des anthropozentrischen Standpunktes in der Wissenschaft, die Kritik des Sinnenscheins, die Ersetzung phantastischer Spekulationen durch nüchterne Verstandesarbeit, die Coppernicus zu unsterblichen Leistungen geführt hatten, ließen sich nicht wieder aus dem Gedächtnis der Menschen tilgen, sie wirkten weiter und halfen ein neues Zeitalter naturwissenschaftlichen Denkens und naturforschenden Arbeitens heraufführen.



2. Keppler.

Messend durchschritt ich die Himmel, durchmesse jetzt irdische Schatten;
Himmelan strebte der Geist, hier ruht sein Schatten, der Leib.
Mensus eram coelos, nunc terrae metior umbras,
mens coelestis erat, corporis umbra jacet.

Kepplers selbstverfaßte Grabschrift.

Dem Coppernicanischen System entstand bald nach seines Urhebers Tod ein mächtiger und gefährlicher Gegner in Tycho de Brahe (1546—1601), der sich durch seine mit den vorzüglichsten Instrumenten und bewundernswertem technischen Geschick, unter dem Beistand zahlreicher Hilfsarbeiter, angestellten Himmelsbeobachtungen eine hochangesehene Stellung schon unter den Astronomen seiner Zeit errang. Während Coppernicus sich noch mit einer bis auf 10′ stimmenden Genauigkeit der Angaben über Sternpositionen begnügte, vermochte Tycho die Abweichung seiner Beobachtungsergebnisse von der Wirklichkeit auf nur 1′ nach der einen oder andern Seite herabzudrücken, so daß höchstens eine Unsicherheit von 2′ bestehen blieb. Wir haben schon erwähnt, daß es ihm dadurch gelang, die von Coppernicus noch festgehaltene Annahme eines ungleichmäßigen Vorrückens der Nachtgleichen auf der Ekliptik als unzutreffend nachzuweisen. Da aber Coppernicus gerade auf jene Überzeugung seine Lehre von der Erdbewegung wenigstens teilweise gestützt hatte, konnte sich Tycho wohl berechtigt glauben, der Unveränderlichkeit der Erdachse (im Sinne der Alten) wieder zu ihrem Rechte zu verhelfen und die ihm auch aus dogmatisch-religiösen Gründen am Herzen liegende Zurückversetzung der Erde in den Mittelpunkt der Welt zu vollziehen. Er vermittelte dabei allerdings insofern



Johann Keppler

zwischen Ptolemaeus und Coppernicus, als er mit diesem an der täglichen Drehung der Erde und an der Bewegung der Planeten um die Sonne festhielt, mit jenem aber die Sonne samt den sie umkreisenden Wandelsternen wieder um die Erde ihre jährliche Bahn beschreiben ließ und so die von Coppernicus erreichten Vereinfachungen in der Darstellung der sogenannten zweiten Ungleichheit der Planeten, ihrer Stationen und Rückgänge, rettete. Man sieht hieran recht deutlich, wie weniger tief eindringenden Köpfen das Coppernicanische System in der Tat nur als eine mehr oder minder willkürliche Abänderung des Ptolemaeischen erschien, als eine, von Osiander in der Vorrede ja ohnehin als solche gekennzeichnete, Hypothese, die man ebensogut oder besser durch eine andere ersetzen könne. Ein bindender Beweis für den Tatbestand fehlte ja auch noch durchaus; er wurde um so dringlicher, je mehr die erreichte Genauigkeit in den Beobachtungen Abweichungen zwischen ihren Ergebnissen und denen der auf Grund der neuen Lehre und der Prutenischen Tafeln angestellten Berechnungen hervortreten ließ. Vor allen Dingen war eine befriedigende Erklärung der ersten Ungleichheit, der unregelmäßigen Bewegungen der Planeten in ihren eigenen Bahnen, von Coppernicus nicht geleistet worden, er hatte sich hier von dem Schematismus der Ptolemaeischen Auffassung nicht frei zu machen vermocht.

Da trat Keppler (oder Kepler, geb. 1571 in Weil, der Stadt, gest. 1630 in Regensburg) als Kämpe auf den Plan, und gerade Tycho de Brahe mußte ihm das Rüstzeug zur Erstreitung des endgültigen Sieges für das Coppernicanische System liefern. Die Hauptsache freilich, die ihm allein den rechten Gebrauch von Wehr und Waffen ermöglichte, ein seltener Reichtum und eine nimmer sich erschöpfende Lebhaftigkeit der Phantasie, eine außerordent-

liche Schärfe des Geistes, eiserner Fleiß und strengste Wahrhaftigkeit, die jedem Selbstbetrug entging, also die Vereinigung der höchsten Forschertugenden war ganz sein eigen. Kepplers Auffassungsart des Kosmos läßt sich uns Modernen vielleicht am leichtesten durch den Hinweis auf eine gewisse Ähnlichkeit mit Goethes Erfassung der Natur nahebringen. Beide durchschauen ihren Gegenstand als ein Ganzes, dessen Äußerungen sich zu einer wohlgegliederten, aber festen, in sich selbst gegründeten Einheit zusammenschließen. Ja, sie vermögen sich gleichsam in sein Inneres hineinzuversetzen, sie empfinden sich als Teil der Weltseele, wirken in und mit ihr, sie fühlen die Kraft, die Schöpfung noch einmal zu schaffen und sie erscheint ihnen eben darum völlig durchsichtig und begreiflich.

Wär' nicht das Auge sonnenhaft,
Wie könnte es das Licht erblicken!
Lebt' in uns nicht des Gottes eigne Kraft,
Wie könnt' uns Göttliches entzücken!

Wie ein befruchtender Frühlingsregen mußte bei solcher Beanlagung auf Keppler das Studium Platos wirken, dem er sich schon in seinen Jünglingsjahren hingeben konnte. Des großen Philosophen Lehre von den Ideen, den realisierten Begriffen und Urbildern der Dinge, die als Begriffe dem Denken durchaus erreichbar sein müssen, als Typen die Erkenntnis des eigentlichen Sinns der Wirklichkeit ermöglichen und durch die Wahrheit hindurch zugleich zum Guten und Schönen führen, — sie wurde der Leitstern für Kepplers Wirken.

Das höchste Ziel seiner Lebensarbeit war die Aufhellung der Idee des Kosmos. Nähere Bestimmtheit und Richtung erhielt dieses Streben von vornherein aus dem Gedankenkreis der pythagoreischen Schule, deren mit mathematischen Elementen durchwebter Mystizismus einen vollen Wider-

hall in Kepplers seelischer Veranlagung fand. Aus Erfahrungen, wie der des Wohlklangs beim gleichzeitigen Ertönen von Saiten, die sich bei sonst gleicher Beschaffenheit nur durch ihre Längen unterscheiden und zwar so, daß die verschiedenen Längen durch die Verhältnisse von ganzen, über 6 nicht hinausgehenden Zahlen ausdrückbar sind, hatten Pythagoras und seine Nachfolger die Überzeugung gewonnen, daß die geordnete Schönheit der Natur und des Alls auf ähnlichen Beziehungen beruhe, wie die Konsonanz der Töne. Ohne schon über den Unterschied zwischen Stoff und Form nachzudenken, erklärten sie die Zahl für das Wesen der Dinge, auf die Entdeckung von Maß und Harmonie in allen Erscheinungen und Vorgängen richteten sich ihre oft sehr phantastischen Spekulationen. In der Tat konnte in einer Zeit, wo noch so gut wie alle Voraussetzungen für eine verstandesmäßige Darstellung der mathematisch bestimmbaren Gesetzmäßigkeit des Naturgeschehens fehlten, nur dichterische Einbildungskraft eine allgemeinere Anwendung des an sich richtigen und fruchtbaren Grundgedankens ermöglichen. Auf einem Gebiete neben der Musik eröffneten sich allerdings auch dem streng wissenschaftlichen Verfahren verlockende Aussichten auf eine befriedigende Durchführung des pythagoreischen Axioms, in der Astronomie. Zu Kepplers Zeiten verhielt es sich damit nicht wesentlich anders als im griechischen Altertum. Man braucht deshalb kaum nach einem äußeren Anlaß zu suchen, durch den Keppler dem Studium der Himmelskunde zugeführt sein möchte; es war eine innere Notwendigkeit, daß ein solcher Jünger des Pythagoras und Plato, der gleichzeitig eine tüchtige mathematische Vorbildung genossen hatte, sich dem Dienste der Muse Urania weihte.

Für die Ergebnisse, die er dabei erreichte, ist selbstverständlich sein besonderer Ausgangspunkt von nicht zu über-

sehender Wichtigkeit, und diesen bildete die freudige Überzeugung von der Richtigkeit der Grundzüge des Coppernicanischen Systems, in das Keppler von seinem Lehrer Mästlin in Tübingen eingeführt wurde. Daß Keppler sehr wohl wußte, was er diesem Unterrichte verdankte, beweist ein Brief, in dem er bescheiden das ihm von Mästlin über seine Arbeiten gespendete Lob auf diesen selbst mit den Worten überträgt: „Bester Lehrer, du bist die Quelle des Flusses, der meine Felder befruchtet."

Noch entscheidender aber als durch den Ausgangspunkt wurden Kepplers Erfolge durch seine Methode bestimmt, die wohl das erste großartige Beispiel des induktiven Verfahrens bietet, das Kepplers Zeitgenosse Baco von Verulam (1561—1626) gleichzeitig theoretisch darzustellen und philosophisch zu begründen bemüht war. Freilich ging, wie wir sahen, Keppler nicht ohne eine gewisse Voreingenommenheit an seine Forscherarbeit heran; daß er Einheit und Einfachheit, Ordnung und Schönheit finden müsse, stand ihm unverrückbar fest. Aber diese Voraussetzungen waren durch eine mehr als 2000jährige zusammenhängende Menschheitserfahrung hinlänglich begründet; ihre Benutzung war vielleicht stärker und leichter zu rechtfertigen, als in späterer Zeit die von Faraday und Hertz ihren Untersuchungen zugrunde gelegte Überzeugung von der Unmöglichkeit unmittelbar in die Ferne wirkender Kräfte. Jede Induktion muß mit Deduktionen aus dem bereits gesammelten Erfahrungsschatze beginnen, sie kann auch der aus diesem Besitze zu gewinnenden Analogie nie entraten. Ihr Wesen besteht vielmehr darin, daß eine auf Grund von solchen Deduktionen und Analogien im voraus entworfene Skizze des Seins und Geschehens mit den Tatsachen durch Beobachtung, Rechnung und, soweit möglich, durch das Experiment verglichen, berichtigt, geändert und nötigenfalls

gänzlich verworfen und durch ein neues Bild ersetzt wird, das dem gleichen Verfahren so lange zu unterwerfen ist, bis eine befriedigende Übereinstimmung zwischen der Wirklichkeit und ihrer Darstellung hergestellt erscheint, kurz bis aus der Hypothese eine Theorie geworden ist, die nicht nur die Gegenwart genau beschreibt und erklärt, sondern auch eine zutreffende Voraussage der Zukunft gestattet. Es gibt kaum einen zweiten Naturforscher, der diesen, dem Planetenlauf vergleichbaren, verwickelten Gang seiner Arbeit, mit den unvermeidlichen Stillständen, gelegentlichen rückläufigen Bewegungen und erneutem Vorwärtsdringen mit gleich ungeschminkter Offenheit in seinen Werken geschildert hat, wie Keppler; er erspart seinem Leser weder den sandigen Weg des vergeblichen Suchens, noch das rauhe Dornengestrüpp unsicheren Tastens nach einer fernen Lichtung, aber er lädt ihn auch ein, fröhlich aufatmend mit ihm auf der keuchend erklommenen Höhe zu verweilen. Die gedrängte Eleganz, mit der neuere Forscher ihre Ergebnisse dem Publikum mitzuteilen pflegen, verschweigt meist die Mißerfolge, und doch sind diese für den Jünger häufig belehrender als die Erfolge! Etwas Zutat von Kepplerscher Selbstkritik würde oft von vornherein der fremden Kritik die schärfsten Waffen rauben!

Die wichtigsten astronomischen Werke Kepplers sind folgende drei: Prodromus dissertationum cosmographicarum seu mysterium cosmographicum, Tübingen 1596 (Vorläufige Erörterungen über den Weltbau oder Das Geheimnis des Weltbaus), Astronomia nova *αἰτιολογητος*, seu physica coelestis, tradita commentariis de motibus stellae Martis, ex observationibus G. V. Tychonis Brahe, Heidelberg 1609 (Neue auf Erforschung der Ursachen ruhende Astronomie oder Naturlehre des Himmels, in Erörterungen über die Bewegungen des Sternes Mars nach den Be-

obachtungen von Tycho Brahe) und Harmonices Mundi libri V, Linz 1619 (Die Weltharmonie in 5 Büchern).

Das erste und dritte Werk sind ganz unmittelbar der Aufdeckung der Harmonie des Alls gewidmet, während das zweite, das nach dem Urteil der Nachwelt die hervorragendsten Leistungen Kepplers enthält, ihm nur die Mittel zu jenen höheren Zwecken liefern sollte. Keppler stellt sich mit seinen Zeitgenossen und Vorgängern die Welt als begrenzt vor und zwar durch die wirkliche Krystallsphäre der Fixsterne, deren Dicke er beiläufig auf 2 deutsche Meilen schätzt; im Mittelpunkte steht die Sonne, zwischen Mittelpunkt und Grenze liegt die Region der Planeten. Im „Geheimnis des Weltbaus" hält er auch noch an den wirklichen Planetensphären fest, zu deren Preisgabe ihn später seine eigenen astronomischen Entdeckungen, das Fehlen jeder Brechung des Lichts an jenen angeblichen Krystallsphären und die Beobachtungen Tychos über den ungehinderten Durchgang der Kometen durch sie zwangen. Dagegen erklärte er sich gegen die Annahme, daß jede Planetensphäre sich bis zur Berührung mit den Nachbarsphären erstrecke; das würde fabelhaft dicke Sphären erfordern und eine unsinnige Verschwendung in der Natur bedeuten, da nach Coppernicus der Abstand zweier benachbarter Planeten selbst dann noch eine erhebliche Größe besitzt, wenn sie die durch die Exzentrizitäten ihrer Bahnen bedingte größtmögliche Annäherung erreicht haben. Es genügt, jeder Sphäre eine solche Dicke zuzuerteilen, als der Betrag der Exzentrizität der betreffenden Planetenbahn erfordert, d. h. eine Dicke gleich der doppelten Exzentrizität. Denn steht die Sonne in S und ist der Mittelpunkt der Planetenbahn C, die Exzentrizität also SC, so bewegt sich der Planet in einer Kugelschale, deren innerer Radius SA seinen kleinsten, deren äußerer SB seinen größten Abstand von der

Sonne angibt, woraus sich durch allereinfachste geometrische Beziehungen (Zeichnung!) die Richtigkeit jener Behauptung ergibt. Unter diesen Voraussetzungen gelingt es nun Keppler, die größten und kleinsten Abstände aller Planeten von der Sonne mit Hilfe der fünf regelmäßigen Vielflächner in eine geometrischen Symmetrieverhältnissen entlehnte Beziehung zueinander zu setzen, die er als Naturgesetz ansprechen zu dürfen meint. Beschreibt man nämlich in die innere Kugel der Saturnsphäre einen Würfel, so berühren dessen Seitenflächen die äußere Kugel der Jupitersphäre, das in deren innere Kugel einbeschriebene Tetraeder ist der äußeren Kugel der Sphäre des Mars umbeschrieben, entsprechend läßt sich zwischen die innere Kugel der Marssphäre und die äußere der Erdsphäre das Dodekaeder, ebenso zwischen Erde und Venus das Ikosaeder und endlich zwischen Venus und Merkur das Oktaeder einschieben. Die rein mathematische Berechnung des äußeren Kugelradius der Marssphäre aus dem inneren der Jupitersphäre ergab in der Tat für jenen genau denselben Wert wie eine Ableitung nach dem Coppernicanischen System, und recht gut stimmten auch die entsprechenden Zahlen für die Venus, alle übrigen aber wichen mehr oder weniger erheblich voneinander ab. Diese Nichtübereinstimmung führte Keppler aus dem luftigen Reiche der Spekulation zunächst wieder auf den festen Boden peinlich genauer Untersuchung der Tatsachen und gab ihm die Veranlassung zur Abfassung seines zweiten Hauptwerkes.

Seine architektonische Idee aufzugeben, war er nämlich durchaus nicht geneigt; er mußte demnach die Schuld an jenen Unstimmigkeiten bei Coppernicus suchen, und zwar in dessen Angaben über die Exzentrizitäten der Planetenbahnen, durch die ja die Dicke der Planetensphären und mithin das Ergebnis der Rechnung mit den regelmäßigen

Körpern wesentlich bestimmt war. Es galt daher vor allen Dingen zuverlässigere Bestimmungen für die Größen der Exzentrizitäten zu gewinnen. Das aber mußte zu erneutem Anfassen der Theorie der ersten Ungleichheit, der ungleichmäßigen Bewegung der Planeten in ihren Bahnen, die im engsten Zusammenhange mit der Exzentrizität steht, und somit ganz allgemein zu Untersuchungen über die Planetenbahnen, ihre Form, Lage und Größe führen. Keppler selbst pflegte zu sagen, es begleite ihn ein Genius, der ihm die Wahrheiten von fernher zulisple; auch dieser Arbeit verschaffte eine solche Ahnung des Richtigen von vornherein eine brauchbare Basis: Er konstruierte den Weltbau nicht wie Coppernicus vom Mittelpunkte der Erdbahn (des orbis magnus), sondern vom Mittelpunkt der Sonne aus; selbstverständlich hatte er nachträglich diese Verschiebung durch die aus ihr fließenden Folgerungen zu rechtfertigen, aber es ist im allgemeinen leichter, hinterher eine durch Inspiration oder Intuition (innere Anschauung) erfaßte Wahrheit zu begründen, als sie durch ein seines Zieles noch durchaus unsicheres Suchen erst zu entdecken. Eine sehr wichtige Folge der neuen Fundamentierung des Kosmos war die Veränderung in der Bedeutung der Apsidenlinie jeder Planetenbahn, d. h. ihrer großen Achse oder der Verbindungslinie von Sonnennähe (Perihel) und Sonnenferne (Aphel) des Planeten. Diese ging nach Coppernicus durch den Mittelpunkt des großen Kreises der Erdbahn, sie mußte also nunmehr durch den Mittelpunkt der Sonne führen. Mit dieser zutreffenden Auffassung war die Möglichkeit richtiger Bestimmungen nicht nur der Größe, sondern auch der Richtung der Exzentrizitäten gegeben; es folgte ferner aus ihr, daß auch die Knotenlinie jeder Bahn, d. h. die Verbindungslinie ihrer Schnittpunkte mit der Ekliptik den Mittelpunkt der Sonne in sich enthält, und das

wiederum ermöglichte erst richtige Breitenbestimmungen der Planeten und enthüllte die Unveränderlichkeit der Lage der Bahnebene jedes Planeten während seines Umlaufs. — Die Erfahrungsdaten, durch die Keppler nicht nur die Richtigkeit dieser Vermutungen prüfte, sondern schließlich auch Größe, Gestalt und Lage wenigstens einer Planetenbahn im Raume, sowie das Gesetz der Umlaufszeit in ihr genau ermittelte, fand er bei Tycho de Brahe, der seit 1599 kaiserlicher Astronom Rudolf II. in Prag war. Keppler wurde 1600 sein Assistent und schon 1601 für länger als 10 Jahre sein Nachfolger, so daß die in 24 Folianten niedergelegten Beobachtungsreihen Tychos zu seiner unbeschränkten Verfügung standen. Sehr vollständige und systematisch wohl geordnete Resultate lagen für Mars vor, dessen Positionen Tycho 16 Jahre hindurch in allen Punkten seines 687 Erdentage währenden Umlaufes mehrfach beobachtet hatte, so daß Keppler wohl sagen konnte: „Durch den Planeten Mars müssen wir zu den Geheimnissen der Astronomie gelangen, oder wir bleiben immer unwissend in dieser Wissenschaft.“ Wegen der besonders großen Exzentrizität seiner Bahn, die sechsmal so groß als die der Erdbahn ist, war außerdem die Entdeckung der wahren Bahnform gerade hier erleichtert. Wenn aber auch Keppler so durch eine Reihe günstiger Umstände unterstützt wurde, blieben die von ihm zu überwindenden Schwierigkeiten und die zu schaffende Arbeit doch noch ungeheuer.

Was er zu leisten hatte, um zu dem Ergebnis zu gelangen, daß sich der Mars in einer Ellipse bewegt, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht, läßt sich einigermaßen aus der Polargleichung der Ellipse erkennen, deren Anwendbarkeit auf den vorliegenden Fall er ja eben nachzuweisen hatte. Sie lautet bekanntlich $r = \frac{p}{1 + \varepsilon \cos \vartheta} = \frac{a(1 - \varepsilon^2)}{1 + \varepsilon \cos \vartheta}$

wo r den Radiusvektor (den von der Sonne nach dem Mars gezogenen Leitstrahl), a die halbe große Achse (die halbe Apsidenlinie), ε die numerische Exzentrizität, d. h. das Verhältnis der linearen Exzentrizität e : a und ϑ die wahre Anomalie, d. h. den vom Perihel aus gemessenen Winkel des Leitstrahls r mit der Apsidenlinie (der Hauptachse der Ellipse) bedeutet. Es war zu untersuchen, „ob die aus den Beobachtungen berechnete Größe des Radiusvektor mit seiner gleichfalls durch die Beobachtung gegebenen Lage jedesmal so zusammenstimmte, wie es die Polargleichung für die Ellipse verlangt" (Apelt). Die hierzu erforderlichen hypothesenfreien Berechnungen der Marsabstände von der Sonne aus den Beobachtungen hat Keppler als erster geleistet und damit zugleich das Längenmaß als ein neues Element in die Astronomie eingeführt. Aus der größten oder kleinsten und der mittleren Entfernung des Planeten von der Sonne ließ sich die Exzentrizität finden. Die Berechnung der wahren Anomalie erforderte vor allen Dingen eine genaue Festlegung der Apsidenlinie der Bahn des Planeten und der jeweiligen Lage seines Radiusvektor. Diese läßt sich aber nur durch Beobachtungen von der Erde aus ermitteln. Für solche gilt die Ekliptik als feste Ebene und die in allen Lagen der Erde unveränderliche Richtung nach dem Frühlingspunkt (die Nachtgleichenlinie) als feste Ausgangsrichtung in dieser Ebene. Um die wahre räumliche Lage jenes Radiusvektor zu erhalten, muß daher die Neigung der Planetenbahn gegen die Ekliptik, ferner die Lage der Durchschnittslinie beider Ebenen (der Knotenlinie) gegen die Nachtgleichenlinie, also die sogenannte Länge der Knotenlinie und endlich die Lage der großen Achse der Planetenbahn (der Apsidenlinie) zur Nachtgleichenlinie durch die Länge ihres Perihels bestimmt werden. Schließlich hängt die Größe der Anomalie ϑ selbst ab von dem Zeit-

punkt der Beobachtung und der mittleren Umlaufszeit, so daß (einschließlich des Radiusvektor und der Exzentrizität) im ganzen sieben Konstanten oder Elemente in die Polargleichung eingehen. Von diesen sieben Größen standen nur die beiden letzten gesichert zur Verfügung; die genaue Kenntnis der Umlaufszeit des Mars durch die Beobachtungen Tychos zusammengenommen mit denen seiner zahlreichen Vorgänger bis hinauf in das Altertum war allerdings für Keppler eine ganz unentbehrliche und unersetzliche Grundlage, ohne die er namentlich die Abstände des Planeten von der Sonne nicht hätte finden können. Aus seinen ebenso scharfsinnigen wie mühseligen Untersuchungen über die ihm gar nicht oder nur unzuverlässig überlieferten Konstanten können wir hier nur einige Hauptpunkte herausheben. Trägt man in eine Himmelskarte die durch die Rektaszensionen und Deklinationen eines Planeten gegebenen Orte ein und verbindet sie durch einen fortlaufenden Linienzug, so stellt dieser eine sich mehrfach durchschneidende zykloidale Kurve vor, deren Gestalt Keppler gelegentlich mit der einer Fastenbrezel verglichen hat. Coppernicus hatte in der verwickelten Bahnkurve eine wesentlich einfachere Form entdeckt, indem er ihre Betrachtung von der Sonne statt von der Erde vorschrieb; die von dem neuen Standpunkte aus nach den beobachteten Orten des Planeten gezogenen Visierlinien fielen in eine Ebene, die den Fixsternhimmel in einem Kreise schneiden mußte. Die wahre Bahnebene im Raume konnte sich aber erst durch die Ermittelung der Länge des von der Sonne nach jedem Planetenort gezogenen Leitstrahls ergeben. Diese mußte wie die Entfernung eines unzugänglichen Punktes auf der Erde trigonometrisch durch Messung einer Basislinie und zweier Winkel ermittelt werden. Die Schwierigkeit, die dabei aus der eigenen Bewegung des Mars erwächst, vermied Keppler dadurch, daß

er zwei Beobachtungen des Planeten an derselben Stelle des Fixsternhimmels, die also um eine oder mehrere ganze siderische Umlaufszeiten des Mars voneinander abstanden, den Rechnungen zugrunde legte. Die Erde mußte bei der zweiten Beobachtung einen anderen Ort im Raume erreicht haben als bei der ersten, da die Umlaufszeiten der beiden Himmelskörper keinen gemeinsamen Teiler besitzen. Die Sehne der von ihr zwischen beiden Beobachtungen durchlaufenen Bahn bildete die Grundlinie des Maßdreiecks. Diese Sehne war weiter durch den Radiusvektor der Erdbahn auszudrücken. Hier sah sich also Keppler wieder auf eine genaue Untersuchung der Erdbahn hingewiesen. Glücklicherweise ist die Abweichung der Form dieser Bahn vom Kreise so gering, daß sie innerhalb der Genauigkeitsgrenzen der Tychonischen Beobachtungen nicht in Betracht kommt. Keppler hielt also mit Recht für die Erde die Kreisbahn fest. Aber er verwarf aus physikalischen Gründen die bisherige Annahme, daß die Erde in gleichen Zeiten gleiche Winkel um den Mittelpunkt ihres Kreises beschreibe. Da nämlich die Sonne, von der die Kraft zu dieser Bewegung nach Kepplers Überzeugung herstammt, nicht in jenem Mittelpunkt steht, ist ihre Wirkung auf die Erde in den größeren Entfernungen (im Aphel) eine geringere als in den kleineren (im Perihel); die Erde muß also in derselben Zeit im Aphel kleinere Bogen zurücklegen als im Perihel. Gleichförmig kann die Bewegung der Erde nur von einem Punkte (punctum aequans) aus erscheinen, der exzentrisch nach dem Aphel zu liegt und zwar genauer auf der Verbindungslinie von Mittelpunkt und Sonne ebensoweit vom Mittelpunkt entfernt wie die Sonne. Ein punctum aequans oder aequalitatis hatte Ptolemaeus für die Bahnen aller fünf Planeten angenommen, Coppernicus verworfen; Keppler führte es als geometrisches Hilfsmittel für die Beschreibung der Erd-

bewegung ein. Die gründliche Prüfung der aus dieser Annahme fließenden Folgerungen an der Erfahrung fand schönen Lohn in der Entdeckung des ersten Gesetzes zunächst in der Form, „daß die Geschwindigkeit des Planeten im umgekehrten Verhältnis zur Entfernung desselben von der Sonne steht“. Äußerlich angesehen ist dieser Satz falsch, die Geschwindigkeit ist vielmehr dem Lote von der Sonne auf die durch den augenblicklichen Ort des Planeten gelegte Bahntangente umgekehrt proportional. Jenes Lot fällt mit dem Radiusvektor nur im Perihel und Aphel zusammen. Keppler hatte seinen Satz in der Tat auch lediglich für diese Punkte begründet und durch eine hier unzulässige Analogie auf die übrigen Bahnpunkte ausgedehnt. Aber man muß den Kepplerschen Satz nicht auf seine Form, sondern auf seinen Inhalt hin betrachten, wie aus den weiteren Ausführungen hervorgeht. Zunächst läßt er sich nämlich so fassen: „Der Aufenthalt (mora)“ des Planeten in jedem Punkte seiner Bahn ist dem zugehörigen Radiusvektor direkt proportional. Hieraus schließt Keppler: Die Summe der Aufenthalte in einer Anzahl aufeinanderfolgender Bahnpunkte ist der Summe der zu diesen Punkten gehörigen Leitstrahlen proportional. Jene Summe ist die Zeit, die zum Durchlaufen irgendeines Bahnstückes erforderlich ist, diese die vom Radiusvektor dabei durchstrichene Fläche. Heutzutage weiß jeder Quartaner, daß eine Linie nicht eine Summe von Punkten und eine Fläche nicht eine Summe von Linien ist. Punkt bedeutet aber hier für Keppler offenbar so viel wie Linienelement und Linie so viel wie Flächenelement, und der „Aufenthalt“ ist das Zeitelement. In die Sprache der Infinitesimalrechnung übersetzt, stellt das zuerst angeführte Gesetz eine Differentialgleichung vor, die durch die soeben mitgeteilte Überlegung integriert wird. „Während Keppler also die ganz richtige Anschauung der

Sache besaß, fehlte ihm noch der Begriff und die Definition" (Göbel). Formal angesehen ist seine Sprache ein Stammeln, aber schließlich entringt sich ihm klar und deutlich das unvergängliche erste Kepplersche Gesetz, das jetzt gewöhnlich als das zweite bezeichnet wird: „Die radii vectores (Keppler sagt bezeichnender radii virtutis die Strahlen der Kraft) beschreiben den Zeiten proportionale Flächen" oder auch: „Der von der Sonne nach einem Planeten gezogene Leitstrahl durchstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen."

Das Gesetz der Bewegung des Mars in seiner Bahn war nun bekannt; welches aber ist die Form dieser Bahn? Mit bemerkenswerter Zähigkeit hielt Keppler zunächst an der Kreisgestalt fest. Er wählte aus dem Material des Tycho vier Beobachtungen des Mars in der Opposition (Stellung: Sonne, Erde, Mars in gerader Linie) aus, wo also die von Sonne und Erde nach ihm gezogenen Gesichtslinien zusammenfielen, und betrachtete diese vier Marsörter als Ecken eines Sehnenvierecks. Es handelte sich nun darum, durch fortgesetztes Probieren die Lage der Apsidenlinie in der so festgelegten Kreisbahn zu ermitteln; jede falsche Annahme in dieser Hinsicht mußte sich durch Nichtübereinstimmung der Beobachtungen mit der nach der Annahme vorausberechneten Länge des Mars verraten.

Erst nach mindestens 70 Versuchen, deren rechnerische Durchführung einen Zeitraum von fünf Jahren erforderte, gelangte Keppler in seiner sogenannten stellvertretenden Hypothese (hypothesis vicaria) zu einem Ergebnis, das zunächst den Durchgang der Apsidenlinie der Marsbahn durch die Sonne außer Zweifel stellte. Die in dieser Hypothese enthaltene Vorstellung vom Vorhandensein eines Punktes, um den sich der Mars gleichmäßig bewege (punctum aequans), erwies sich aber als durchaus unhaltbar. Berechnete man nämlich unter dieser Voraussetzung die Marsörter in

den Oppositionen, so zeigte sich für die 90° von der Apsidenlinie entfernten eine hinreichende Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Rechnungsergebnissen; „aber 45° von der Apsidenlinie stieg der Unterschied auf 8 Minuten". Zu des Coppernicus Zeiten hätte man sich hierbei beruhigt, aber nach Tychos Arbeiten war das nicht mehr angängig; „sola igitur haec octo minuta, sagt Keppler, viam praeiverunt ad totam Astronomiam reformandam." (Diese 8 Minuten allein eröffneten den Weg zur Erneuerung der ganzen Astronomie). Nur eine zur Apsidenlinie symmetrische Bewegung des Mars ließ sich tatsächlich aufzeigen. Durch diese Ergebnisse aber war die Überzeugung von der Kreisbahn erschüttert. Sie mußte aufgegeben werden, als in der früher angedeuteten Weise verschiedene Entfernungen des Mars von der Sonne durch den Erdradius gemessen wurden. Denn drei beliebig ausgewählte Messungen hätten die Elemente eines Kreises, der ja durch drei Punkte gegeben ist, vollständig und eindeutig bestimmen müssen; im Widerspruche hiermit ergaben sich aber aus anderen Messungen andere Größen der Elemente; die Bahn konnte also kein Kreis sein. Die in ihrem weiteren Gang von uns bereits skizzierte Analyse führte endlich auf das zweite Kepplersche Gesetz, das aus systematischen Gründen an erster Stelle genannt zu werden pflegt: die Figur der Marsbahn (und weiterhin aller Planeten) ist eine Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

Mit berechtigtem Stolze hat Keppler im Titel seiner Untersuchungen über den Mars die Bezeichnung: „astronomia nova αἰτιολογητος seu physica coelestis" („eine hypothesenfreie Astronomie oder Physik des Himmels") gebraucht. Sein Genie und sein Fleiß hatten in der Tat ganz neue Grundlagen der astronomischen Forschung gefunden; nicht mehr willkürliche Annahmen, sondern durch eine umfassende

Induktion gefundene, nicht abstrakt geometrische Formen, sondern Naturgesetze regelten fortan den Planetenlauf, die Physik des Himmels hatte das Licht der Welt erblickt. Die gleichförmige Kreisbewegung mochte als unmittelbarer Ausdruck und Ausfluß göttlichen Wesens einer weiteren Erklärung nicht bedürftig sein, für die elliptische Bahn mußten natürliche Ursachen gesucht werden, an die Stelle der zerstörten festen Sphären traten Naturkräfte. Die Ansichten Kepplers über diese Kräfte sind freilich noch ein gärendes Gemisch altüberlieferter und neu sich emporringender Vorstellungen. In der Sonne sitzt eine anima motrix, eine bewegende Seele, die in den Verlängerungen der Radien der Äquatorebene nach allen Seiten hin ihre Kraft ausstrahlt. Da die Sonne sich um eine durch ihren Mittelpunkt gehende Achse dreht, wie in der Tat ein Jahr nach dem Erscheinen des Kommentars über den Mars durch die Beobachtungen von Galilei und Johann Fabricius an Sonnenflecken nachgewiesen wurde, reißen ihre Kraftstrahlen die Planeten im Wirbeltanz mit sich herum, die näheren schneller, die entfernteren langsamer, alle geschwinder im Perihel als im Aphel, alle aber in längerer Zeit als in der Umdrehungsdauer des Zentralgestirns sowohl wegen ihrer Entfernung als auch wegen ihres Trägheitswiderstandes. Daß nämlich die Planeten nicht in den Himmelsraum hineinstürzen, ist eine Folge ihrer Trägheit, ihrer Geneigtheit zur Ruhe, vermöge deren sie diesen Zustand nur gezwungen verlassen, eine Erklärung, in der man freilich gerade den wichtigsten Teil des Beharrungsgesetzes noch vermißt. Merkwürdig ist Kepplers Irrtum, daß die von der Sonne ausgehende Kraft im einfachen Verhältnis der Entfernung von ihrem Ursprung abnehme, eine Folge der Vorstellung, daß jene Emanation nur in der Äquatorebene, nicht räumlich, sondern linear erfolge. Von einer Vor-

ahnung des Newtonschen Gravitationsgesetzes ist in dieser ganzen Idee keine Spur zu finden; Kepplers Kraftstrahlen lassen sich mit den Speichen eines Rades vergleichen, die irgendwelche Körper mit sich herumführen, es handelt sich um keine zentripetale, sondern um eine tangentiale Wirkung. Daß die Planeten nicht Kreise, sondern Ellipsen beschreiben, erklärt Keppler durch eine in jedem Planeten befindliche Magnetachse, die dauernd nach derselben Himmelsgegend gerichtet ist und deren einer Pol von der Sonne angezogen, deren andrer von ihr abgestoßen wird; im Perihel ist der Sonne der befreundete, im Aphel der feindliche Pol zugekehrt. Die Verschiedenheit der Exzentrizitäten der Planetenbahnen ist auf Unterschiede in der Magnetisierungsstärke der zugehörigen Magnetachsen begründet und hat zum Zweck die Harmonie.

Keppler kehrt hier wieder zu seiner Lieblingsidee zurück, deren Durchführung auf Grund der nunmehr erledigten Vorarbeiten im letzten astronomischen Hauptwerk, der Harmonice mundi zum Abschluß gebracht wird. An dem Aufbau des Planetensystems unter Zugrundelegung der fünf regulären Körper hält er fest. Da aber die nunmehr errechneten genauen Entfernungen der Planeten von der Sonne nur eine angenäherte Verwirklichung jenes Urtypus erkennen lassen und obendrein die Bewegungen der Planeten einen mehrfachen Wechsel in der Größe des Abstandes von je zwei Nachbarplaneten hervorbringen, sucht Keppler in den Elementen und Gesetzen dieser Bewegungen das zweite den Weltenbau schöpferisch bestimmende Prinzip, die Harmonie im strengen Sinne des Wortes. Dabei kommt er auf die Untersuchung des Zusammenhanges der mittleren Entfernungen mit den mittleren Bewegungen der Planeten, und hier enthüllt sich ihm das dritte Gesetz, das er selbst im 3. Kapitel des 5. Buches so ausspricht: „Es ist

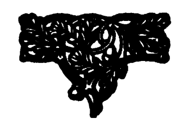
völlig gewiß, daß das Verhältnis von den periodischen Umlaufszeiten je zweier Planeten genau das anderthalbe von dem Verhältnis der mittleren Distanzen, d. h. der Planetensphären selbst ist. Die Umlaufszeit der Erde z. B. beträgt ein Jahr und die des Saturn 30 Jahre. Wenn man aber die Kubikwurzel von der Zahl 30 nimmt und diese aufs Quadrat erhebt, so findet man genau das Verhältnis der mittleren Distanz der Erde und des Saturn von der Sonne. Denn das Quadrat der Kubikwurzel von 1 ist 1; die Kubikwurzel von 30 aber ist etwas größer als 3, und daher das Quadrat dieser Kubikwurzel auch etwas größer als 9. Saturns mittlere Distanz von der Sonne aber ist ebenfalls nur etwas größer, als neunmal die Distanz der Erde von der Sonne" (nach Apelt). Wir können mit Hilfe der Potenzexponenten kürzer sagen: „Die Quadrate der Umlaufszeiten zweier Planeten verhalten sich zueinander wie die Kuben ihrer mittleren Entfernungen vom Zentralkörper." Dieser Satz sollte bald aus der „Harmonie der Welt", wo ihn eine dichte Hecke mystischer, wenn auch geistvoller und tiefsinniger Spekulationen umwucherte, befreit und in das Licht der modernen Mechanik gestellt, sich als Keim des das Universum umspannenden Newtonschen Attraktionsgesetzes erweisen.

Für Keppler selbst hatten seine drei Gesetze neben ihrer idealen Bedeutung auch einen rein praktischen Wert, sofern sie ihn in den Stand setzten, die zu Ehren seines kaiserlichen Schutzherrn Rudolf II. als Rudolfinische bezeichneten Tafeln zu vollenden. Wie bis dahin von den praktischen Astronomen mit den Prutenischen Tafeln gerechnet wurde, ohne daß sie sich alle zu den Grundlehren des Coppernicus bekannten, so nahmen sie nun für ein Jahrhundert die Rudolfinischen in Gebrauch, ohne daß sich hieraus auf eine schnelle und weite Verbreitung von Kepplers wissenschaftlichen Ent-

deckungen schließen ließe. In dem Dialog über die Weltsysteme, der 23 Jahre später als der Kommentar über den Mars erschien, äußert sich selbst Galilei so, als wenn Keppler sein Werk gar nicht verfaßt hätte; er sagt: „Wie nun aber jeder Planet bei seinem besonderen Umlauf sich verhält und welche genaue Beschaffenheit seine Bahn aufweist — Probleme, die gewöhnlich als die Theorie des betreffenden Planeten bezeichnet werden, das mit Bestimmtheit zu entscheiden, vermögen wir noch nicht. Als Zeugnis dessen mag der Mars angeführt werden, der heutzutage den Astronomen so viel Mühe verursacht.“ Das von Keppler mit wunderbarer Genialität und unendlichem Fleiße gehandhabte induktive Verfahren wurde ihm sogar gelegentlich als Fehler angerechnet; Riccioli tadelt in seinem almagestum novum, daß Keppler die Lehre von der elliptischen Bewegung a posteriori, also durch Erfahrung begründet habe und nennt die Kepplerschen Gesetze Hypothesen! Wenn Keppler zweifellos schon bei Lebzeiten ein berühmter Mann war, so ist dieser Ruhm jedenfalls nur zum geringsten Teil aus dem Verständnisse seiner dauernd wertvollen wissenschaftlichen Leistungen — von den Rudolfinischen Tafeln abgesehen — entsprungen, vielmehr wohl auf das astronomische Erstlingswerk und die durch glückliche Voraussagen aus den Stellungen der Gestirne, also durch astrologische Betätigung gewonnene Gunst hoher Gönner zurückzuführen.

Wir werden als nächstes Ergebnis der astronomischen Arbeiten Kepplers die endgültige Sicherung des Coppernicanischen Systems festzustellen haben. Aus den Grundgedanken dieses Systems heraus hatte er in steter, enger Fühlung mit der Beobachtung die wahre Bahnform und die Art der Bewegung in ihr ermittelt. Die Einfachheit der Ergebnisse und die Zuverlässigkeit der auf sie gestützten Vorausberechnungen bezeugten sieghaft die Richtigkeit

des Ausgangspunktes. Sie selbst aber wurden wieder die Keime weiteren Fortschrittes, einer noch strafferen gedanklichen Zusammenfassung des Geschehens, des Verständnisses der Architektonik des Weltganzen aus einer einzigen Idee. Dieser Fortschritt selbst freilich war nur durch eine weise Selbstbeschränkung der Naturwissenschaft möglich. Sie begnügte sich fortan damit, die Form des Geschehens zu finden und zu ergründen, aus dem Werden das Gewordene zu begreifen, soweit es eben durch das Werden bedingt ist. Aber das eigentlich Seiende nimmt sie dankbar und bescheiden aus der Hand des Schöpfers entgegen, sie sucht es wohl als konkrete Zahl zu erfassen, aber sie verzichtet darauf, es selbst in der Weise der Pythagoräer und Platos aus abstrakten arithmetischen und geometrischen Beziehungen abzuleiten. Keppler, der Mitbegründer der modernen Naturwissenschaft, war zugleich der letzte Pythagoräer.





Galileo Galilei

NSchB 4: Keferstein, Große Physiker.

3. Galilei.

Wer aber Augen hat, körperliche und geistige,
der nehme diese zum Führer.
Galilei, Dialog über die Weltsysteme 2. Tag.

Die katholische Kirche, die dem Coppernicanischen Weltsystem bei seiner ersten Bekanntgabe wohlwollende Aufmerksamkeit geschenkt hatte, fand keine Veranlassung, gegen seine Vertiefung und seinen weiteren Ausbau durch Keppler eine feindselige Stellung einzunehmen. Der mächtige Jesuitenorden insbesondere erblickte in den Prutenischen und Rudolfinischen Tafeln ein willkommenes Werkzeug seiner politischen religiösen Pläne im fernen Osten; sie sicherten ihm die Überlegenheit über die einheimischen Astronomen auf der Pekinger Sternwarte bei der Voraussage von Finsternissen und anderen himmlischen Erscheinungen und damit den erstrebten Einfluß auf Hof und Volk in China. Mit gelehrten Jesuiten trat Keppler in freundschaftlichen wissenschaftlichen Gedankenaustausch, und der Orden ließ es nicht an Versuchen fehlen, sich ihn noch enger zu verbinden. Die durch das heliozentrische System erreichte Vereinfachung und Vervollkommnung aller astronomischen Berechnungen war so handgreiflich, daß weder die wissenschaftliche Astronomie noch die praktische Schiffahrtskunde auf die neuen Rechnungsgrundlagen verzichten konnten. Das Bedürfnis einer Prüfung des Ausgangspunktes der Tafeln war bei der überwiegenden Mehrzahl der Benutzer nicht vorhanden. Nicht wesentlich anders geht es ja noch heutzutage beim Gebrauch solcher Hilfs-

mittel zu; wieviel mehr mußte dies in einer Zeit der Fall sein, in der die große Masse in tiefster Unwissenheit lebte, wo außerdem die Sachverständigen die längst gewonnene Überzeugung, daß der Ptolemaeische Weltbau durchaus nicht als treues Abbild der Wirklichkeit, sondern zunächst nur als Rechnungshypothese aufzufassen sei, unwillkürlich und unmerklich auch auf die neue Lehre übertragen mußten.

Einen gänzlichen Umschwung in dieser Lage der Dinge brachte das Auftreten von Galilei hervor (geb. 1564 zu Pisa, gest. 1642 zu Arcetri bei Florenz). Die Nachwelt nennt Galilei vorzugsweise als Gründer der modernen Mechanik, und sicher liegen seine hervorragendsten wissenschaftlichen Leistungen auf diesem Gebiete; die Mitwelt hat ihm für seine Entdeckungen am Himmel und für seine Verteidigung des Coppernicanischen Systems die schönsten Kränze, freilich auch eine bittere Dornenkrone geflochten; das ihm in den Mund gelegte, wenngleich sicher nie gesprochene: eppur si muove, und sie bewegt sich doch, gibt einen deutlichen Fingerzeig, welcher der zahlreichen Lichtstrahlen, die von diesem Genius ausgingen, den lebhaftesten Reflex im Geiste der Zeitgenossen fand. Der Unterschied zwischen den beiden Ruhmestiteln ist freilich kein wesentlicher. Galilei ist nicht nur einer der ersten Astrophysiker, indem er sich namentlich mit der physischen Beschaffenheit des Mondes eingehend befaßte; er verstand es vor allen Dingen, die von ihm an irdischen Vorgängen entwickelte neue Wissenschaft der Bewegungslehre zu der Frage der realen Bedeutung des Coppernicanischen Systems in engste Beziehung zu setzen und die erste Ahnung von der Gültigkeit der das Geschehen auf der Erde regelnden Gesetze für das ganze Weltall leise heraufdämmern zu lassen. Diese Verknüpfung der Mechanik mit der Astronomie, eine geistige Großtat ersten Ranges, war die eigentliche Ursache für den tragischen Ausgang von

Galileis Leben. Auch dem blöderen Auge mußte deutlich werden, daß es sich bei der Entscheidung für Ptolemaeus oder für Coppernicus hinfort nicht um eine rein akademische Streitfrage handle, nicht um ein Problem, das durch die Kunst der Dialektik entschieden werden könne, nicht um den Kampf zweier Hypothesen, sondern um einen lediglich durch die Erfahrung, aus der Beobachtung der Wirklichkeit festzustellenden Tatbestand. Die noch immer zahlreichen und in einflußreichen weltlichen und kirchlichen Stellungen befindlichen Anhänger der peripatetischen Schule des Aristoteles sahen sich den Fehdehandschuh hingeworfen, die Autorität ihres Meisters und seiner Kommentatoren wurde in Frage gezogen, die Hauptquelle der Gelehrsamkeit des ganzen Mittelalters, zu der sich noch immer alle drängten, die mehr nach Ansehen als nach Wahrheit dürsteten, drohte verschüttet zu werden. Wer etwa noch an solcher Gefahr zweifeln mochte, dem offenbarte sie Galilei mit einer aus dem siegesgewissen Glauben an sich selbst entspringenden sorglosen Offenheit, die er zu seinem Schaden obenein oft mit überlegenem Spott verband. Solcher Hohn traf namentlich einige Mitglieder des Jesuitenordens. Galilei bekundet sich hierin wie nach vielen anderen Seiten als eine echte Egmontnatur; es läßt nicht nur einen augenfälligen Mangel an diplomatischem Geschick, sondern eine geradezu souveräne Verachtung der Kunst, die Menschen zu gewinnen, und nach dem eigenen Willen zu lenken, erkennen, wenn er sich auf der einen Seite die mächtige Gesellschaft Jesu zum erbitterten Feinde machte und auf der anderen als eins der höchsten Ziele seines Lebens betrachtete, der Coppernicanischen Lehre die offizielle Anerkennung des Hauptes der katholischen Christenheit zu erringen. So mußte er an dem Felsen Petri zerscheitern und der stärkeren Macht, wenn auch nicht das Opfer seines Lebens, so doch das kaum minder

harte seiner Freiheit und seiner Überzeugung zur Sühne darbringen.

Die wesentlichsten Fortschritte, die Galilei für die Astronomie als Wissenschaft teils selbst heraufgeführt, teils vorbereitet hat, knüpfen sich an die Erfindung des noch heute seinen Namen tragenden Fernrohrs, das er auf Grund von Nachrichten über die von Holland her 1608 und 1609 in den Handel gebrachten Teleskope selbständig nachkonstruierte. Er war jedenfalls einer der ersten, die das neue Instrument auf den gestirnten Himmel richteten und, dank seinem unermüdlichen Eifer, seiner scharfen Auffassung und der Sicherheit seines Urteils, der erfolgreichste Beobachter und Entdecker in den erdenfernen Räumen. Im Sternenboten (Sidereus Nuncius) gab er 1610 seine Funde den Zeitgenossen bekannt. Im Dialog über die Weltsysteme erzählt er, wie sich auf dem Monde zahlreiche Erhabenheiten und Vertiefungen zeigen, „welche in aller und jeder Beziehung unseren rauhesten und abschüssigsten Gebirgen ähneln. Etliche darunter sind langgestreckt und ihre Ausläufer sind hunderte von Meilen lang; andere sind in gedrängteren Gruppen; auch gibt es viele abgesonderte Klippen von ungeheurer Steilheit und Schroffheit. Was man aber in größter Zahl wahrnimmt, sind gewisse sehr hohe Dämme, welche Plateaus von verschiedener Größe einschließen und umgeben und mannigfaltige Formen besitzen, vornehmlich aber kreisförmige. Bei vielen befindet sich in der Mitte ein Berg von bedeutender Höhe.“ Ebendort wird beschrieben, wie man die der Sonne ausgesetzten Höhenkämme in hellem Lichte erblickt, „hinter ihnen die Schattenprojektionen in tiefem Dunkel“; die Grenzlinie zwischen dem beleuchteten und dem finsteren Teile des Mondes sieht „gekerbt und zackig“ aus. Viele erleuchtete Spitzen liegen abseits von dem übrigen leuchtenden Teile. Die obengenannten Schatten

sieht man „allmählich kürzer werden, wenn die Beleuchtung mehr von oben kommt, bis sie ganz verschwinden, wenn die ganze Hemisphäre erleuchtet ist. Wenn umgekehrt sodann das Licht nach der anderen Mondhemisphäre rückt, wird man die ähnlichen Hervorragungen wie zuvor beobachten, die Schatten hingegen werden sich nach der entgegengesetzten Seite hin projizieren und allmählich wachsen." Man glaubt fast einen Atlas für jeden Tag des Mondalters vor sich zu sehen, wie er zuerst in den gestochenen Kupferplatten des Bierbrauers und Ratsherrn von Danzig Johannes Hevel 1647 verwirklicht wurde. Durch aufmerksames Verfolgen eines am äußersten Nordwesten und eines anderen diametral gegenüber am Südostrande des Mondes gelegenen Fleckens entdeckte Galilei die sogenannte parallaktische Libration des Mondes, infolge deren der Erdbewohner im Laufe der Zeit etwas mehr als die Hälfte der Mondkugel zu Gesicht bekommt. Zur Bestimmung der Höhe von Mondbergen gab Galilei eine noch heute zur Verwendung kommende Methode an. Weiter fand er die Sichelgestalt von Venus („Cynthiae figuras aemulatur mater amorum") und undeutlicher von Merkur, ebenso die dem Coppernicanischen System gemäße Verschiedenheit der scheinbaren Größe von Venus und Mars in Opposition und in Konjunktion. Zahllose Sterne enthüllten sich am Fixsternhimmel, namentlich in der Milchstraße. Der Ring des Saturn wurde zwar als solcher nicht von ihm erkannt, die sonderbare Gestalt des Planeten fiel ihm aber doch so auf, daß er davon nach der Sitte der Zeit im Sternboten seinen Lesern durch ein Anagramm von 37 Buchstaben Kenntnis gab; der arme Keppler mühte sich, begreiflicherweise vergeblich, aus den möglichen 6881 Quintillionen Permutationen die richtige herauszufinden und erfuhr erst durch Vermittlung seines Kaisers von Galilei die Lösung „altis-

simum planetam tergeminum observavi“, ich habe den obersten Planeten dreigestaltig beobachtet, er glaubte nämlich zu beiden Seiten des Saturn kleine Kugeln erblickt zu haben (Wolf). Die Sonnenflecken sind zwar von Galilei nicht zuerst, aber jedenfalls sehr eingehend beobachtet und in ihrer Zugehörigkeit zur Sonnenoberfläche richtig erkannt worden (vgl. Dialog 3. Tag.). Die größte Bedeutung hatte die Entdeckung von vier Jupitermonden; praktisch gedachte Galilei Beginn oder Ende ihrer Verfinsterungen zur Längenbestimmung auf See zu verwerten, da ja der Eintritt jener Ereignisse an verschiedenen Punkten der Erde im gleichen Augenblick, aber zu ungleichen Ortszeiten, deren Differenz eben die Länge bestimmt, gesehen werden müsse. Olaf Römer, der einige Jahrzehnte später die für diesen Zweck erforderlichen Tafeln erstellte, verfiel dabei auf seine berühmte Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit. Freund wie Feind erkannten sehr wohl, daß diese erstaunlichen Funde der Naturerklärung aus den Schriften des Aristoteles ein Ende bereiten mußten. Mit den nichtigsten Einwänden suchten die Peripatetiker das Geschaute und hundertfach Bestätigte hinwegzudisputieren oder wenigstens in seiner Bedeutung abzuschwächen. Zunächst brachten sie es fertig, die Idee des Fernrohres von dem Stagiriten selbst herzuleiten, berichte er doch von dem Brunnenrohr, aus dessen Tiefe man die Sterne bei Tage erblicken könne! Im übrigen handle es sich bei den angeblichen Beobachtungen um Sinnestäuschungen, die durch die Beschaffenheit der Linsen des Teleskopes herbeigeführt würden. „Du bist beinahe der Einzige,“ schrieb Galilei an Keppler, „der meinen Angaben vollkommen Glauben beimißt. Als ich den Professoren am Gymnasium zu Florenz die vier Jupiterstrabanten durch ein Fernrohr zeigen wollte, wollten sie weder diese noch das Fernrohr sehen, sie verschlossen ihre

Augen vor dem Lichte der Wahrheit. Diese Gattung Menschen glaubt, in der Natur sei keine Wahrheit zu suchen, sondern nur in Vergleichung der Texte (das sind ihre Worte). Gegen Jupiter können weder Giganten noch Pygmäen streiten. Was ist zu tun? Wollen wir es mit Demokrit oder Heraklit halten? Ich denke, wir lachen über die ausgezeichnete Dummheit des Pöbels. Wie würdest du gelacht haben, wenn du gehört hättest, wie der erste unter ihnen in Gegenwart des Herzogs sich bemühte, die neuen Planeten bald mit logischen Argumenten, bald mit magischen Verwünschungen vom Himmel herabzureißen."

Mit frohem Selbstgefühl durfte Galilei den Dolmetsch seiner Überzeugungen Salviati im Dialog ausrufen lassen: „O Nikolaus Coppernicus, wie hättest du dich gefreut, durch so klare Tatsachen dein System bestätigt zu sehen!" Er selbst konnte sich mit solchen Waffen und mit dem Rüstzeug, das ihm sein Neubau der Mechanik lieferte, zuversichtlich in den Kampf wagen. In seinem ersten Hauptwerke, dem Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemaeische und das Coppernicanische (Florenz 1632) hat Galilei aus der Fülle seines Wissens und seiner Erkenntnisse heraus mit der ihm in seltenem Maße eigenen Kunst tief eindringender und alle Seiten des jeweilig zur Erörterung stehenden Problems erfassender, dabei stets leicht verständlicher und in künstlerischen Formen sich bewegender Darstellung das Für und Wider des heliozentrischen Systems erwogen, jeden der üblichen Einwände als nichtig nachgewiesen und die zu seinen Gunsten sprechenden Gründe zusammengestellt. Die wichtigen Kepplerschen Gesetze freilich werden nirgends erwähnt, sie scheinen in der Tat Galilei unbekannt geblieben zu sein, obwohl er im Dialog einmal auf eine Stelle aus der nova astronomia Bezug nimmt. Der Standpunkt Galileis in der theoretischen Astronomie

erreicht nicht die Höhe des Kepplerschen; er hält an der Aristotelischen Lehre von der Kreisbewegung als der vollkommensten Bewegung, weil in jedem ihrer Punkte Anfang und Ende zusammenfallen, mit Coppernicus fest; die beweglichen Teile der Welt müssen sich kreisförmig bewegen, die etwa nicht bewegten ruhen, „denn nur die Ruhe und die Kreisbewegung sind geeignet, die Ordnung aufrecht zu erhalten." Für eine Torheit erklärt er es, über die Anordnung der Weltkörper Gesetze aufstellen zu wollen, bringt aber doch in seinen beiden Hauptwerken, im Dialog sowohl wie in den Discorsi eine Idee zur Sprache, die man als Analogon zum dritten Kepplerschen Gesetze betrachten kann, nur daß sie leider mit den Tatsachen nicht übereinstimmt. Der Weltenschöpfer ,meint er, könne wohl die sämtlichen Planetenkugeln an einem und demselben Orte des Raumes verfertigt haben, um sie dann mit gleichförmig beschleunigter Bewegung fallen zu lassen; an einem bestimmten Punkte der Fallstrecke sei jeder Planet von ihm in Drehbewegung um den der Sonne angewiesenen Mittelpunkt versetzt worden und zwar so, daß er die am Ende jener Fallstrecke erlangte Geschwindigkeit als gleichförmige Umdrehungsgeschwindigkeit beibehielt. Saturn würde also den kürzesten Weg, Merkur den längsten durchfallen haben. Von dieser Kosmogonie abgesehen, lehnt Galilei Erörterungen über das, was die Welt im Innersten zusammenhält, ab, von der Kepplerschen Sonnenkraft als einer qualitas occulta will er, wie überhaupt von Fernkräften durchaus nichts wissen. „Wie konnte er (Keppler) bei seiner freien Gesinnung und seinem durchdringenden Scharfblick, wo er die Lehre von der Erdbewegung in Händen hatte, Dinge anhören und billigen, wie die Herrschaft des Mondes über das Wasser, die verborgenen Qualitäten und was der Kindereien mehr sind?" Eine göttliche Satzung gestattet uns wohl, „den Bau des

Weltalls forschend zu suchen," versagt uns jedoch für immer, „das Werk seiner Hände wirklich zu durchschauen, in der Absicht vielleicht, daß die Tätigkeit des Menschengeistes nicht abgestumpft und ertötet werde".

Galilei beabsichtigte, in dem Dialog über die Weltsysteme eine im besten Sinne des Wortes populär gehaltene Darstellung und Erörterung des Coppernicanischen Systems zu geben. Er benutzt dazu die Form des Dialogs, die er mit der Meisterschaft eines Plato handhabt. Drei Personen, Salviati, der als Dolmetsch der Ansichten Galileis auftritt, Sagredo, der mit lebhaftem Geiste die neuen Lehren ergreift, scharfsinnige Folgerungen daran knüpft und mit feurigem Temperament die peripatetischen Torheiten oft derb abfertigt und Simplicio, der die Ansichten des Aristoteles als gründlicher Kenner des Philosophen aber als recht unwissender Geometer und Physiker mit dem der peripatetischen Schule eigentümlichen Autoritätsglauben halsstarrig verteidigt, führen eine viertägige wissenschaftliche Unterredung. Am ersten Tage wird die Frage zur Erörterung gestellt, ob man die Erde mit Recht als Stern unter Sternen, als einen Planeten betrachten dürfe, oder ihr eine Sonderstellung in den Himmelsräumen anzuweisen habe, am zweiten Tage wird ihre tägliche Drehung, am dritten die jährliche und am vierten die Erscheinung der Gezeiten verhandelt. Bei Bekämpfung der Aristotelischen Lehrmeinungen verschmäht Galilei-Salviati nicht immer dialektisch-spitzfindige Fechterkunststücke, sei es, daß er sich von den Fesseln doch nicht völlig frei machen konnte, deren er spottete, sei es in der Absicht, den Gegner mit dessen eigenen Waffen besonders wirksam zu treffen. Im allgemeinen aber finden wir hier, meist zum ersten Male, alle die Gründe entwickelt, die noch heute für das heliozentrische System ins Feld geführt werden.

Für das Thema des ersten Tages lieferten die neuen astronomischen Entdeckungen reichen Stoff. Aristoteles hatte die Unveränderlichkeit und Unzerstörbarkeit des Himmels im Gegensatz zu der Veränderlichkeit der Teile der Erde behauptet. Demgegenüber kann Galilei auf die beiden neuen Sterne von 1572 und 1604 und auf die Sonnenflecken hinweisen, die aufs deutlichste Erzeugung und Vernichtung am Himmel beweisen. Des näheren erörtert er die große Ähnlichkeit der Beschaffenheit von Mond und Erde; beide sind kugelförmig, beide an sich dunkel und undurchsichtig, so daß sie das Sonnenlicht zurückzuwerfen vermögen, wie in einer Abschweifung auf das Gebiet der Optik eingehend nachgewiesen wird, die Oberflächen beider besitzen ein übereinstimmendes Aussehen, einem Mondbewohner würde die Erde in gleicher Zeit denselben Phasenwechsel zeigen, wie ihn der Erdbewohner am Monde wahrnimmt, beide Körper beleuchten und verfinstern sich wechselseitig. Dieser Übereinstimmung in den wesentlichsten Punkten gegenüber kann das wahrscheinliche Fehlen von Wasser auf dem Monde und die notwendig völlige Verschiedenheit einer etwaigen Lebewelt auf ihm von der unsrigen nicht ins Gewicht fallen. Der Versetzung der Erde in den Mittelpunkt des Weltalls bereitet Galilei Schwierigkeiten durch die zweifelnde Frage, ob von einem solchen Punkte im unendlichen Raume überhaupt die Rede sein dürfe; der von der geradlinigen Abwärtsbewegung der schweren Körper hergenommene Aristotelische Beweis sei jedenfalls nicht stichhaltig, da aus jener Erscheinung sich nur schließen lasse, daß die Teile der Erde dem Erdmittelpunkt, ihrer gemeinsamen Mutter, entgegeneilen, nicht aber dem jedenfalls nur gedachten Mittelpunkt des Weltalls, einem „Nichts ohne irgendwelche Wirkungsfähigkeit".

Der zweite Tag bringt für die 24stündige Drehung der Erde zunächst die schon von Coppernicus geltend gemachten

Gründe bei, vertieft allerdings und geklärt durch gründliche Auseinandersetzungen über die Relativität der Bewegungen. Als Bewohner der Erde können wir eine etwaige Bewegung an ihr nur aus der Wahrnehmung einer allen Körpern außer ihr in gleicher Weise scheinbar zukommenden Bewegung erschließen. Eine solche ist aber die 24stündige Drehung des Himmels von Ost nach West. Welch ungeheurer Körper müßte bewegt werden, wie unermeßlich groß müßte seine Drehungsgeschwindigkeit sein, wenn es sich hierbei um eine Wirklichkeit handelte! Wieviel natürlicher ist es, sie als einen Schein zu erklären, der durch die 24stündige Drehung der verhältnismäßig kleinen Erde mit einer mäßigen Geschwindigkeit von West nach Ost hervorgerufen wird, da doch die Natur „nach allgemeiner Ansicht nicht viele Mittel aufbietet, wo sie mit wenigen auskommen kann“ und die einzige Wirkung der Bewegung, die gegenseitige Lagenänderung der Erde und der übrigen Weltkörper bei der einen Annahme sich genau so ergibt wie bei der anderen! Außerdem zeigt sich ohnehin neben der ost-westlichen Drehung der Fixsternsphäre eine west-östliche der Planetensphären; ist es da nicht „einfacher und natürlicher, alles mit einer Bewegung abzumachen,“ als mit zwei? Ferner sieht man, daß die Umlaufszeiten der Planeten mit wachsender Größe ihrer Sphäre immer größer werden, auch die Beobachtung der Mediceischen Gestirne, der Jupiterstrabanten liefert dafür einen Beleg; diese ganze Ordnung wird umgestürzt, wenn man der ungeheuren Fixsternsphäre die kurze Umlaufszeit von 24 Stunden zuschreibt. Dazu würde noch die schwer faßliche Vorstellung kommen, daß sich die Fixsterne je nach ihren verschiedenen Abständen vom Himmelsäquator mit den allerverschiedensten Geschwindigkeiten bewegen müßten. Ja diese Geschwindigkeiten wären noch außerdem im Laufe der Jahrtausende Veränderungen durch die

Präzession unterworfen, während alle unzweifelhaft bewegten Gestirne „als Bahn einen größten Kreis" haben und diese unveränderlich beibehalten. Wie soll man sich ferner eine mit der von Ptolemaeus behaupteten Bewegung der Fixsterne vereinbare Beschaffenheit ihrer Sphäre vorstellen. Höchst merkwürdig endlich wäre es, wenn sich der unermeßlichen Kraft, die der höchsten Himmelsregion als der ursprünglichen Bewegerin aller Sphären zukommen müßte, nur „der kleine Erdball hartnäckig und eigensinnig" widersetzte. Auf Grund all dieser Überlegungen „muß uns nach dem sehr richtigen Axiom des Aristoteles: frustra fit per plura quod potest fieri per pauciora (es ist zwecklos, mehr Mittel aufzuwenden, wo weniger ausreichen) die tägliche Bewegung der Erde viel wahrscheinlicher vorkommen als die des Weltalls mit Ausnahme der Erde."

Galilei wendet sich nun der Widerlegung der von den Peripatetikern gegen die Achsendrehung der Erde erhobenen Einwände zu: Ein frei fallender oder senkrecht in die Höhe geschleuderter Körper, Wolken und Vögel müßten hinter dem sich drehenden Erdball, mit dem sie keine Verbindung haben, westlich zurückbleiben; eine horizontal nach Osten abgefeuerte Kanonenkugel würde dicht bei dem Geschütz niederfallen, eine nach Westen abgeschossene dagegen einen ungeheuer weiten Flug ausführen; ein ständiger Ostwind müßte uns das Zurückbleiben der Luft hinter der Erddrehung fühlbar machen; wie die Erdschollen von einem sich drehenden Wagenrad müßten alle Körper von der Erdoberfläche abfliegen; ein Italiener würde heute Mittag in Konstantinopel speisen und sein Abendbrot in Japan einnehmen. Offensichtlich entspringen alle diese Gegengründe gänzlich ungeklärten Vorstellungen über die Bewegungserscheinungen; das Beharrungsgesetz, die Relativität jeder Bewegung, die Zusammensetzung verschiedener

Bewegungen eines Körpers zu einer einzigen wurden eben erst von Galilei, zum Teil in Anschluß an seinen Vorgänger Benedetti erfaßt, obwohl auch er noch nicht überall zum allgemeinsten Ausdruck für sie gelangte. Die Widerlegung der peripatetischen Gegner wird also aus den Grundsätzen der neuen Bewegungslehre geschöpft.

Aristoteles unterscheidet die natürliche und die gewaltsame Bewegung; die erste kommt den Körpern infolge eines ihnen von Natur innewohnenden Triebes zu, wie die geradlinige Bewegung abwärts den schweren Körpern, die entgegengesetzte dem Feuer; die zweite ist durch fortdauernde Berührung des Bewegenden und des Bewegten bedingt bzw. auf die Wirksamkeit des Mediums, in dem die Bewegung stattfindet, also der Luft, zurückzuführen, wenn jene fortdauernde Berührung offenbar nicht vorhanden ist, so namentlich bei der Wurfbewegung. Eine vom Werfenden dem geworfenen Körper eingeprägte Kraft, ein Beharrungszustand, ist in der peripatetischen Philosophie verpönt. Galilei weist aus den alltäglichsten Erscheinungen die Richtigkeit dieser Lehre vom bewegenden Medium nach: die bewegte Luft trägt ganz leichte Stoffe viel rascher und weiter als schwere, während doch ein geworfener Stein sich geschwinder und in größere Fernen bewegt als eine geschleuderte Flocke Baumwolle, es muß also „doch im Steine noch etwas anderes sein, abgesehen von der Bewegung der Luft“; dieses Etwas erhält sich in schweren Körpern länger als in leichten, denn eine Bleikugel pendelt ganz erheblich länger als eine an einem gleich langen Faden aufgehängte Kugel aus Baumwolle; wie soll also die Luft, die innerhalb der Luft gar keine Schwere hat, ganz allein von allen Körpern eine empfangene Bewegung beibehalten? Sie kommt vielmehr sehr schnell wieder zur Ruhe, wie man an dem Verhalten eines brennenden Kerzchens oder eines Blätt-

chens Flittergold in einem Zimmer bemerkt, in dem ein Handtuch geschwenkt wurde. Ein kräftiger Wind bewegt einen zu seiner Richtung quer liegenden Pfeil leichter als einen in seiner Längsrichtung befindlichen, aber ein in der Querlage abgeschossener Pfeil fliegt erheblich weniger weit, als ein solcher, dessen Spitze nach vorn gerichtet ist. „Es ist ebenso falsch, das Medium als bewegende Ursache des geworfenen Körpers zu betrachten, wie es richtig ist, daß dieses allein ihm hinderlich entgegentritt". Weiter läßt sich aber auch positiv nachweisen, daß in gewissen Fällen einem Körper seine Bewegung unvertilgbar eingeprägt ist. Galilei erinnert an die Beobachtung, daß auf einer schiefen Ebene ein Körper sich freiwillig mit beschleunigter Bewegung abwärts und zwar um so geschwinder bewegt, je stärker die Neigung der Ebene ist und nur durch eine Kraft in der Ruhelage zurückgehalten werden kann, ferner an die Tatsache, daß umgekehrt zur Aufwärtsbewegung eine Kraft notwendig ist, die den Körper vorwärts treibt, und daß diese Bewegung ständig abnimmt, bis der Körper schließlich zur Ruhe kommt, daß sich aber der Körper hier um so weiter bewegt, je geringer die Erhebung der Bahn ist. Daraus ist zu schließen, daß ein Körper auf einer weder abschüssigen noch ansteigenden Ebene, wo also weder von einem natürlichen Trieb zu einer Bewegung abwärts noch von einem Widerstande gegen eine Bewegung aufwärts die Rede sein kann, entweder in Ruhe oder aber, nach einem in irgendwelcher Richtung empfangenen Anstoß, in gleichförmiger Bewegung in dieser Richtung verharren wird, sofern „alle zufälligen, äußerlichen Hindernisse" entfernt werden. Weder abschüssig noch ansteigend sind aber solche Ebenen, deren Teile sämtlich gleichweit vom Mittelpunkt der Erde entfernt sind, wie dies z. B. für alle ruhigen Wasseroberflächen zutrifft. Das ist die Form des Beharrungsgesetzes, die im Dialog

von Salviati aus Simplicio herauskatechisiert wird, und an der Galilei auch sonst festgehalten hat, wie verschiedene Stellen in den Discorsi erkennen lassen. Er hebt dort z. B. in der Erörterung zu Probl. IX. Prop. XXIII hervor, daß man nur bei der Bewegung eines Körpers auf einer horizontalen Ebene bemerken könne, „daß der Geschwindigkeitswert, den der Körper aufweist, in ihm selbst unzerstörbar enthalten ist," daher „die Bewegung in der Horizontalen eine unaufhörliche sei". Überträgt man die hier mitgeteilten Gedanken Galileis in die Sprache der modernen Physik, so erhält man den Satz, daß die Verschiebung einer Masse längs einer Niveaufläche in dem Gravitations-Kraftfeld der Erde keine Arbeit gegen die Feldkräfte erfordert. Tatsächlich freilich benutzt Galilei das Beharrungsgesetz auch in der uns geläufigen Fassung bei der Untersuchung des schiefen Wurfs; im Dialog wird erwähnt, daß die Richtung des Geschützlaufs maßgebend für die Bewegung der abgeschossenen Kugel sei, „sie verläßt diese Linie nicht oder würde sie doch nicht verlassen, wenn ihr eigenes Gewicht sie nicht nach unten ablenkte," aber eine exakte Formulierung dafür findet sich bei ihm nicht.

Immerhin steht nunmehr fest, daß jeder Körper, der einmal in Berührung mit der rotierenden Erde war, mag es ein fallender Stein oder ein fliegender Vogel sein, die empfangene Bewegungsgeschwindigkeit auch nach der Trennung dauernd und unverlierbar beibehält, genau so, wie in einer geschlossenen Schiffskajüte alle Gegenstände einschließlich der Luft und etwa in ihr schwebender Mücken und Schmetterlinge die Geschwindigkeit des Schiffes oder Kugeln, die ein Reiter in der Hand hält, die des Pferdes annehmen. Wenn dem aber so ist, dann kann sich zwischen den Bewegungsvorgängen auf ruhender und bewegter Erde kein Unterschied zeigen oder genauer, aus den Be-

wegungen auf der Erdoberfläche lassen sich weder gegen noch für die Achsendrehung der Erde Argumente gewinnen. Wenn die Spitze einer Schreibfeder an Bord eines von Venedig nach Alexandrette in ruhiger Fahrt segelnden Schiffes eine Spur ihres Weges hinterlassen könnte, so würde sie einen Kreisbogen aufzeichnen; wäre die Feder dabei beständig von einer Hand gehalten worden, die sie ab und zu einen oder zwei Finger breit da- und dorthin bewegt hätte, so würde dies an dem außerordentlich langen Linienzug nur ganz geringfügige Änderungen hervorgebracht haben. Ein Maler aber kann während jener Seereise auf einem Blatte Papier „ein ganzes Historienbild mit vielen völlig richtig konturierten und in tausend und abertausend Richtungen schattierten Figuren herstellen", genau, wie wenn das Schiff still gestanden hätte. Die Bewegung von Venedig nach Alexandrette kommt eben dem Papier und der Feder, sowie allen im Schiffe befindlichen Dingen gemeinsam zu, dagegen werden die Fingerbewegungen des Malers nur der Feder, nicht aber dem Papier mitgeteilt. Allgemein ergibt sich die Erkenntnis, „daß die Bewegung ohne Einfluß auf das gegenseitige Verhalten solcher Dinge ist, denen sie gemeinsam zukommt." Aus ihr leitet Galilei in sehr einfacher Weise den Satz ab, der in unserem Physikunterricht durch Loewys Wurfapparat bewahrheitet wird, daß die Fallzeit beim freien Fall und horizontalen Wurf mit beliebiger Anfangsgeschwindigkeit bei gleichem Ausgangspunkt der Bewegung stets dieselbe ist. Ob nämlich ein Stein von der Spitze des Mastes auf einem ruhenden oder einem in beliebig schneller Fahrt begriffenen Schiffe fällt, ändert an seiner Falldauer offenbar nicht das geringste, obwohl bei wachsender Geschwindigkeit die schrägen oder krummen Bahnen des Steins immer länger werden; die Ankunftszeit auf der Erde ist also von seiner horizontalen Geschwindigkeit völlig unabhängig.

Galilei behandelt in diesen Zusammenhängen auch eine Reihe von Aufgaben aus der Zusammensetzung von Bewegungen. Von besonderer Bedeutung für die Geschichte der Physik ist die Untersuchung über die absolute Bahn eines fallenden Körpers, die aus einer gleichförmigen Kreisbewegung infolge der Erdrotation und einer gleichförmig beschleunigten geradlinigen Bewegung senkrecht dazu resultiert, wenn Galilei auch im Dialog dabei zu einem sachlich falschen Ergebnisse gelangt.

Sehr notwendig war schließlich den Einwänden der Peripatetiker gegenüber eine gründliche Erörterung über die Zentralbewegung. Salviati-Galilei erklärt, „daß schwere Körper, welche rasch um ein festes Zentrum geschwungen werden, den Trieb empfangen, sich von diesem Zentrum zu entfernen.“ Bewegt man in dieser Weise einen kleinen, mit Wasser gefüllten Eimer an einer mit der Hand gehaltenen Schnur, so läuft das Wasser nicht heraus, sondern man fühlt, „wie die Schnur einen Zug ausübt und sich von der Schulter zu entfernen strebt.“ Aus einem Loch im Boden des Eimers spritzt das Wasser ebenso sehr gen Himmel, wie seitlich und nach der Erde hin heraus.

Nach moderner Ausdrucksweise handelt es sich nun um folgendes. Ein Körper auf der Oberfläche der Erde hat in irgendeinem Augenblicke infolge der Achsendrehung der Erde eine zu ihrer Oberfläche tangential gerichtete Geschwindigkeit. Nach dem Beharrungsgesetz würde er sich mit dieser Geschwindigkeit gleichförmig in gerader Linie weiter bewegen. Infolge der Verbindung mit der Erde durch eine Befestigung oder durch seine Schwere tritt aber in einem folgenden Augenblicke eine Zerlegung der Geschwindigkeit, die ihre ursprüngliche Richtung nicht beibehalten kann, in zwei Komponenten ein, von denen die eine in die Richtung der Bahntangente in dem jetzt erreichten Punkte fällt,

während die andere radial nach außen gerichtet ist und als Wirkung der Zentrifugalkraft in einem sehr kleinen Zeitteilchen angesehen werden kann. Wird diese Zentrifugalkraft bei hinreichend großer Umdrehungsgeschwindigkeit gleich der Schwere oder vermag sie die feste Verbindung mit der Erde zu zerstören, so bleibt nur die erste Geschwindigkeitskomponente wirksam, und es tritt das Abfliegen in der Richtung der Tangente der augenblicklichen Bewegungsrichtung ein. Galilei bemüht sich mathematisch zu begründen, daß dieser Fall an der Erdoberfläche nie eintreten kann. Er will dabei Simplicio-Aristoteles selbst das Zugeständnis machen, daß leichte Körper eine geringere Schwerebeschleunigung haben sollen, als schwere, obwohl er schon hier hervorhebt, daß der Unterschied in den Fallzeiten solcher Körper aus gleicher Höhe sicher lange nicht so groß ist, als die Aristotelische Behauptung von der Proportionalität zwischen Fallzeit und Gewicht glauben machen möchte. Der Beweis, der sich einer graphischen Darstellung des Zusammenhangs zwischen Fallzeiten und Fallgeschwindigkeiten bedient und sogar unendlich kleine Größen 1. und 2. Ordnung unterscheidet, gipfelt in dem Schluß, daß ein auf der Erde liegender Körper den Fallraum Null zurückzulegen habe, um auf der Erde zu bleiben; da nun der Körper, selbst wenn er noch so leicht sein sollte, doch keinesfalls gewichtslos ist, also sicher immer noch einen Trieb zur Abwärtsbewegung hat, ist dieser gewiß „mehr als ausreichend, um den Körper auf die Peripherie zurückzubringen; denn er steht von ihr um die kleinste Strecke, nämlich um nichts, ab.“ Zur Verstärkung dieses Arguments betrachtet Galilei Räder von verschiedenem Durchmesser, die auf ihrer Peripherie einen Stein mit sich fortführen. Durch nicht ganz einwandfreie Überlegungen kommt er zu dem Ergebnis, daß mehr Kraft erforderlich ist, um den Stein am kleinen

Rade, als an dem großen Rade festzuhalten. „Es ist also klar: je mehr das Rad wächst, umsomehr verringert sich die Schwungkraft.“ Die Darlegung läßt erkennen, daß Galilei zu einer richtigen Auffassung der Zentral- bzw. der Rotationsbewegung noch nicht gelangt war. Hätten ihm schon unsere Formeln für die Zentrifugalbeschleunigung $\frac{v^2}{r} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ zur Verfügung gestanden, so wäre aus ihnen ohne weiteres zu folgern gewesen, daß bei gleichen Bahngeschwindigkeiten v, aber verschiedenen Radien r die Zentrifugalkraft allerdings auf dem Körper mit größerem Radius die geringere ist, daß dagegen bei gleichen Umlaufszeiten T gerade das Umgekehrte stattfindet. Der Irrtum Galileis ist wahrscheinlich dadurch entstanden, daß ihm die falsche Formel $\frac{v}{r}$ vorschwebte. Daß ihm dagegen der richtige Zusammenhang zwischen Bahngeschwindigkeit v und Umlaufszeit T völlig klar war, geht aus einer späteren Stelle hervor, wo er die östliche Abweichung einer aus der Mondsphäre frei auf die Erde fallenden Kanonenkugel voraussagt, für den Fall, daß die Kugel in jener Sphäre an der 24 stündigen Drehung der Erde teilnehmen sollte. „Denn bei der Annäherung an die Erde muß die drehende Bewegung in immer kleineren Kreisen stattfinden; wenn also die Kugel die nämliche Geschwindigkeit bewahrt, welche sie in der Mondsphäre hatte, so mußte sie die Rotation der Erde überholen.“ Die Richtigkeit dieses Schlusses ist bekanntlich durch geeignete Versuche (z. B. von Benzenberg im Michaeliskirchturm zu Hamburg 1802) bestätigt worden.

In fast überraschender Weise tritt die freie, echt philosophische Denkweise von Galilei bei Abfertigung der gegnerischen Behauptung hervor, der Erdball könne sich nicht kreisförmig bewegen, weil den schweren und leichten Körpern weder ein inneres noch ein äußeres Prinzip der

Kreisbewegung zukomme. Was Mars und Jupiter bewege, sagt er, werde wohl auch die Bewegungsursache der Erde sein. Vorläufig lasse sich dieses Rätsel ebensowenig lösen, wie eine befriedigende Antwort auf die Frage zu finden sei, durch welche Ursache die schweren Teile der Erde nach unten getrieben werden. Mit dem Aussprechen des Wortes „Schwere" rücke man der Erkenntnis der Sache nicht im geringsten näher. „In der Tat haben wir ebensowenig ein Verständnis für das Prinzip oder die Kraft, welche den Stein nach unten treibt, als wir begreifen, was ihn nach oben bewegt, nachdem er die Hand des Schleudernden verlassen, oder was den Mond in seiner Kreisbahn erhält." Die Aristotelische Unterscheidung gewaltsamer und natürlicher Bewegungen, aus der jener Einwand entnommen ist, erscheint obenein sehr fragwürdig. Denn ein Stein, der in einen durch den Mittelpunkt der Erde hindurch getriebenen Schacht fiele, würde seine Bahn bis zum Mittelpunkte mit natürlicher, beim Hinausgehen über ihn mit gewaltsamer Bewegung zurücklegen, ohne daß sich eine Änderung des ihm innewohnenden Bewegungsprinzips ausfindig machen ließe. Ebenso taucht eine aus großer Höhe auf Wasser fallende Kugel ein erhebliches Stück in dieses ein, obwohl für sie die Abwärtsbewegung im Wasser widernatürlich ist. Eine Kugel, die eine schiefe Ebene hinabgerollt ist, steigt auf einer andern wieder in die Höhe, und ähnliches beobachtet man an einer pendelnden Bleikugel. Freilich hat sich Galilei trotz dieser zutreffenden Bemerkungen von der bekämpften Lehre nie ganz freimachen können, und an der Auffassung, daß alle irdischen Körper sich vermöge eines ihnen innewohnenden Triebes dem Mittelpunkte der Erde entgegenbewegen, scheint er zeitlebens festgehalten zu haben, ein Beispiel dafür, wie schwer es selbst für ein Genie ist, sich von überkommenen Anschauungen völlig loszusagen und

die als richtig erkannten neuen Bahnen ohne Straucheln zu beschreiten.

Am dritten Tage dreht sich das Gespräch hauptsächlich um die jährliche Bewegung der Erde. Salviati erinnert an die Beobachtungstatsachen, daß Mars, Jupiter und Saturn in ihrer größten Erdnähe sich mit der Sonne in Opposition zur Erde, in größter Erdferne in Konjunktion befinden und Venus und Merkur sich nie weit von der Sonne entfernen, dabei aber bald vor, bald hinter ihr stehen, wie aus der Sichelgestalt der Venus in Erdnähe und ihrem vollen Glanze bei kleinster Scheibe, also in Erdferne, sich ergibt, und Simplicio muß auf Grund hiervon mit eigener Hand den Plan des Weltbaus im Sinne des Coppernicus aufzeichnen, in den sich „schicklich" dann auch die Erde einfügt. Gewisse bisher zu Recht bestehende Bedenken gegen diesen Weltplan kann Galilei durch die mit dem Fernrohr erlangten Ergebnisse beseitigen. Namentlich die scheinbaren Veränderungen des Durchmessers der Planeten in Erdnähe und Erdferne entsprachen den Anforderungen der Theorie nicht, wenn man sie mit Hilfe des unbewaffneten Auges festzustellen suchte. Galilei weist darauf hin, daß hierbei die Irradiation (nach heutiger Bezeichnung) eine große Rolle spielt; das Auge liefert uns von glänzenden und weit entfernten Objekten Bilder, die von einem so langen und dichten Strahlenkranz umgeben sind, daß der eigentliche Kern ganz bedeutend vergrößert erscheint. Der Mars zeigt sich infolgedessen dem bloßen Auge in Erdnähe statt 60 mal, nur 4 oder 5 mal so groß als in Erdferne (der kleinste scheinbare Durchmesser des Mars ist 3,3″, der größte 23″, das Verhältnis der größten Scheibe zur kleineren also nur $(23 : 3{,}3)^2 \sim 49$), bei der Venus ist ein Unterschied fast unmerklich, Phasenänderungen sind an ihr so nicht zu bemerken. Ferner durfte Coppernicus der Vorwurf

gemacht werden, daß er nur dem Mond gestatte, die allgemeine Ordnung des Planetensystems zu durchbrechen und sich um die Erde zu bewegen. Durch das Teleskop aber werden die von der Theorie geforderten Verhältnisse der scheinbaren Durchmesser bestätigt, es enthüllt die Sichelgestalt der Venus, und im Jupiter lernen wir gleichsam eine zweite Erde mit sogar 4 Monden kennen!

Die große Vereinfachung der Erklärung für die 1. Ungleichheit des Planetenlaufs wird gebührend betont und an einer Zeichnung erläutert; wir sehen hier alles Sonderbare beseitigt „und auf gleichförmige, regelmäßige Bewegungen zurückgeführt."

Daß an den Fixsternen nicht ähnliche Unregelmäßigkeiten wie an den Planeten zu beobachten sind, wird durch ihre ungeheure Entfernung bedingt, im Vergleich zu der die jährliche Bahn der Erde unmerklich klein ist. Mit Unrecht wenden die Anhänger des Ptolemaeus ein, daß aus einem unermeßlichen Abstande der Fixsterne auch eine unermeßliche Größe für sie folgen müsse, denn sie stützen diesen Schluß auf falsche Parallaxenbestimmungen, die ihren Grund in dem auch die Fixsterne einhüllenden Strahlenkranze haben. Galilei teilt ein einfaches Verfahren mit, durch das sich der scheinbare Durchmesser eines Fixsterns annähernd richtig bestimmen läßt und zeigt durch eine Rechnung, bei der der Halbmesser der Erdbahn zu 1208 Erdradien (statt 23 000 bis 24 000), der scheinbare Durchmesser der Sonne richtig zu $1/2^{\circ}$ und der scheinbare Durchmesser eines Fixsterns 6. Größe zu $5/6''$ (also zu groß) angenommen wird, daß ein solcher Fixstern nicht größer als die Sonne zu sein braucht, damit durch die jährliche Bewegung der Erde keine scheinbare Ortsveränderung an ihm wie bei den Planeten verursacht werde. Eine noch viel größere Entfernung der Fixsternsphäre als die hier berechnete ergibt sich, wenn man ihre

Entfernung aus der von Ptolemaeus für sie zur Erklärung der Präzession angesetzten Umlaufszeit von 36000 Jahren unter Zugrundelegung des Verhältnisses, in dem die Planetensphären mit ihren Umlaufszeiten wachsen, herleitet. Auf den Einwurf Simplicios, welchen Zweck eine solche ungeheure Größe der Fixsternsphäre haben solle, gibt Salviati die für die Denkart Galileis bezeichnende Antwort: „Zuviel maßen wir uns an, scheint mir, wenn wir meinen, einzig die Sorge um uns, erschöpfe das Wirken der Weisheit und Macht Gottes, darüber hinaus tue und ordne sie nichts. Ich aber möchte, daß wir den Arm Gottes nicht so verkürzen." Es ist frevelhaft, „unsere schwache Vernunft zum Richter zu setzen über die Werke Gottes, alles das im Weltall eitel oder überflüssig zu nennen, was nicht unserm Nutzen dient." Überhaupt sind groß und klein, unermeßlich und winzig relative Begriffe, und der Elefant übertrifft die Ameise, der Walfisch den Stichling sicher in gleichem Verhältnisse wie die Fixsternsphäre die Mondsphäre.

Übrigens erwähnt Galilei, daß vielleicht auch die Fixsterne noch einmal Zeugnis für die jährliche Bewegung der Erde ablegen würden. Er legt dabei die Ansicht zugrunde, daß sie nicht über eine einzige Kugelfläche hin zerstreut seien, sondern sich in sehr verschiedenen Entfernungen von uns, „etliche wohl zwei- oder dreimal weiter" als gewisse andere befinden mögen. „Wenn sich also mittels des Fernrohres herausstellte, daß ein sehr kleiner Stern ganz dicht bei einem der größeren steht, daß mithin ersterer sehr hoch stände, so könnte es wohl geschehen, daß eine merkliche Änderung ihrer gegenseitigen Lage einträte, analog den Erscheinungen an den oberen Planeten." In der Tat hat Bessel 1837—1838 durch eine solche Änderung im Winkelabstand zweier dicht benachbarter Fixsterne, die nach Ver-

lauf eines halben Jahres eintrat, die jährliche Parallaxe des Sterns 61 im Schwan zu 0,51″ ermittelt.

An einer noch jetzt in jedem Atlas zu findenden Figur, in der die Erde in ihren Stellungen zur Sonne während der Zeit der Äquinoktien und Solstitien gezeichnet ist, wird dargetan, daß der höhere und tiefere Stand der Sonne im Laufe des Jahres, der Wechsel in den Jahreszeiten, sowie die Ungleichheiten in den Längen von Tag und Nacht an verschiedenen Orten der Erde genau in gleicher Weise eintreten müssen, wenn man das Coppernicanische, als wenn man das Ptolemaeische System zur Erklärung heranzieht.

Schließlich hat Galilei noch die Behauptung des Aristoteles zu widerlegen, „daß einem einfachen Körper von Natur nur eine einzige einfache Bewegung eignen könne", der entgegen Coppernicus der Erde drei Bewegungen, die tägliche, die jährliche und die Deklinationsbewegung beilegt. Hinsichtlich der beiden ersten, die ja in gleicher Richtung erfolgen, beruft sich Galilei auf die entsprechende Erscheinung an einer, eine schiefe Ebene hinabrollenden Kugel. Die dritte aber kommt „durchaus von Natur und ohne irgendwelche bewegende Ursache jedwedem schwebenden und im Gleichgewicht befindlichen Körper zu". Nimmt man eine Schüssel voll Wasser, auf dem eine hölzerne Kugel schwimmt, in die Hand und dreht sich auf den Fußsohlen, so fängt die Kugel an, sich entgegengesetzt zu drehen und beendigt ihre Umdrehung mit der des Gefäßes. Diese Bewegung ist aber „nichts Wirkliches, sondern bloßer Schein", die Lage der Kugel bleibt in bezug auf das Zimmer und auf alles das, was an der Bewegung des Menschen und des Gefäßes unbeteiligt ist, völlig unverändert. Genau so verhält es sich mit der Erde, die eine in dünner, nachgiebiger Luft schwebende Kugel ist. Unter Bezugnahme auf das Buch Gilberts

de magnete (1600), das er von einem peripatetischen Philosophen geschenkt erhalten hat, der es weggab, „wahrscheinlich um seine Bibliothek vor dem Ansteckungsstoff zu hüten", weist Galilei, der offenbar selbst eifrig mit Magneten experimentiert hat, endlich noch darauf hin, daß das Axiom des Aristoteles auch durch jede Magnetnadel widerlegt werde; denn dieser komme die dreifache Bewegung infolge ihrer Schwere, der Deklination und der Inklination zu. Alle bis hierher zugunsten des Coppernicanischen Systems angeführten Gründe sind Wahrscheinlichkeitsgründe. Einen zwingenden Beweis für die Tatsächlichkeit der beiden Erdbewegungen glaubt Galilei allem Anschein nach aus der Erscheinung der Gezeiten herleiten zu können. Er vermag für sie keine andere Ursache ausfindig zu machen als die doppelte Bewegung der Erde. Hier setzen sich zwei gleichförmige Bewegungen zu einer ungleichmäßigen zusammen, die in periodischem Wechsel bald beschleunigt, bald verzögert ist. Fällt nämlich für irgendeinen Ort der Erde zu einem Zeitpunkt die Richtung der täglichen Drehung mit der des jährlichen Umlaufs zusammen, so wird nach 12 Stunden für ihn die Richtung der einen Bewegung der der andern entgegengesetzt sein; in jenem Falle erfahren die Wassermassen auf der Erdoberfläche eine Beschleunigung, in diesem eine Verzögerung und dadurch kommt das in Flut und Ebbe sich äußernde Hin- und Herströmen des Wassers in größeren Meeresbecken zustande. Es mag nicht ausgeschlossen sein, daß die Galileische Überlegung bei der Erklärung des verwickelten Phänomens eine gewisse Rolle spielt, die wesentlichen Seiten des Vorgangs, der freilich zu Galileis Zeiten noch wenig erforscht war, lassen sich aus ihr nicht ableiten.

Das zweite Hauptwerk Galileis, die Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica ed ai movimenti locali, Leiden 1638

(Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend) bezeichnet S. Günther als ein „Standard Work“, „in welchem der große Mann die Summe aus fünfzigjähriger, konsequent dem nämlichen Ziele zugewendeter Geistesarbeit zog.“ Der bisherige Entwicklungsgang der Astronomie ließ erkennen, daß ihr weiterer Fortschritt von der Schöpfung einer neuen Bewegungslehre abhängig sei. Die naturphilosophischen Ansätze dazu, wie sie sich bei Aristoteles fanden, erwiesen sich als Werkzeuge wissenschaftlicher Formung des Beobachtungsmaterials und Mittel tieferer Begründung der empirisch festgestellten Gesetze durchaus untauglich. Die aufmerksame Prüfung der alltäglichsten Vorgänge an der Erdoberfläche mußte außerdem die größten Zweifel an der Richtigkeit der peripatetischen Aufstellungen erwecken, und die Beachtung solcher Erscheinungen in der Umgebungswelt kam mehr und mehr in Übung, nachdem der Humanismus die scholastische Binde von den Augen der Menschheit gerissen hatte. Wie im Frühling die ersten Blüten schüchtern aus dürrem Laub und Gras und kalter, kahler Erde hier und da sich dem wärmenden Sonnenlichte entgegendrängen, traten im Jahrhundert 15 allmählich die Anfänge einer neuen Wissenschaft, der Dynamik, hervor. Sie finden sich bei Leonardo da Vinci, Ubaldo del Monte, Simon Stevin, Benedetti, aber die Arbeiten dieser Männer blieben zum Teil zunächst völlig unbekannt, und was bekannt wurde, waren nur zerstreute Teile eines Neubaus. Man wird Galilei den Ruhm nicht nehmen können, auf diesem Gebiete der bahnbrechende und führende Geist gewesen zu sein; der Ehrentitel des Begründers der Dynamik gebührt ihm in diesem Sinne mit vollem Rechte. Den Glanzpunkt seiner Leistungen bildet die in den Discorsi am 3. und 4. Tage behandelte Fest-

stellung der Fallgesetze und der Form der Wurflinie. Er selbst rühmt: „Über einen sehr alten Gegenstand bringen wir eine ganz neue Wissenschaft.“ Das Leitmotiv von Galileis Forschung gibt hier, wie bei allen seinen Untersuchungen, die philosophische Überzeugung von der Einfachheit des Naturgeschehens; die Natur verwendet bei Ausübung aller ihrer Verrichtungen die allerersten, einfachsten und leichtesten Hilfsmittel. Diese Grundidee leidet nun freilich scheinbar an einer großen Unbestimmtheit. Sie ist aber bei Galilei kein abstraktes, sondern ein abstrahiertes Prinzip, entnommen aus der eingehenden Beobachtung des Verfahrens der Natur in vielen einzelnen Fällen. Wie das Fliegen am einfachsten und leichtesten von statten geht, das muß uns der Vogel, wie das Schwimmen, das muß uns der Fisch lehren. So beabsichtigt Galilei auch nicht, eine allgemeine Definition der beschleunigten Bewegung überhaupt aufzustellen und aus jener die dieser zukommenden Eigenschaften abzuleiten; er ist vielmehr „entschlossen, diejenigen Erscheinungen zu betrachten, die bei den frei fallenden Körpern in der Natur vorkommen“ und will „die Definition der beschleunigten Bewegung“ zusammenfallen lassen „mit dem Wesen einer natürlich beschleunigten Bewegung“. Er behält sich also vor, seine Erklärungen an der Erfahrung zu prüfen und so lange zu berichtigen, bis sie eine von Widersprüchen freie Darstellung der Wirklichkeit ermöglichen.

Durch die neuesten historischen Forschungen ist es wahrscheinlich geworden, daß die Darstellung Galileis in den Discorsi die Entwicklung seiner Ideen über Fall und Wurf in umgekehrter Ordnung wiedergibt. Wahrscheinlich bildete seinen wirklichen Ausgangspunkt die Vermutung, daß die Wurflinie beim horizontalen Wurfe eine Parabel sei und durch das Zusammenwirken von zwei Bewegungen, einer horizontalen und einer vertikalen, zustandekomme. Dann

mußten nach der mathematischen Natur dieser Kurve bei jener in gleichen Zeiten gleiche Strecken, bei dieser im quadratischen Verhältnis der Zeiten wachsende Strecken zurückgelegt werden. Die zweite Bewegung wurde von ihm als Fallbewegung erkannt. Durch Versuche an der schiefen Ebene stellte er für eine solche das quadratische Weg-Zeitgesetz als Tatbestand fest, wodurch zunächst die Vermutung über die Wurflinie eine wertvolle Bestätigung erhielt. Erst weiterhin wurde es ihm klar, daß das Weg-Zeitgesetz seine tiefer liegende Wurzel in der Beschaffenheit der Geschwindigkeitszunahmen fallender Körper habe und sich aus dem Gesetze dieser Zunahmen herleiten lassen müsse. Dieses Gesetz aber fand er nicht durch den Versuch, durch den es vielmehr erst lange nach Galilei mit Hilfe der Atwoodschen Fallmaschine bestätigt worden ist, sondern durch Überlegung. Er wandte seine Gedanken darüber so lange hin und her, bis ihre Folgerungen sich der Erfahrung anpaßten und insbesondere das bereits festgestellte Weg-Zeitgesetz sich aus ihnen herleiten ließ (nach Poske). In den Discorsi, denen wir nun folgen wollen, steht diese gedankliche Analyse allen übrigen voran.

Der Sinnenschein lehrt, sagt Galilei, „daß ein aus der Ruhelage von bedeutender Höhe herabfallender Stein nach und nach neue Zuwüchse an Geschwindigkeit erlangt.“ Diese Ausdrucksweise enthüllt die wichtige, im Beharrungsgesetz enthaltene Erkenntnis, daß jeder gewonnene Geschwindigkeitswert dem Körper unverlierbar erhalten bleibt. Kein Zuwachs aber, so überlegt Galilei weiter, ist einfacher als ein in immer gleicher Weise erfolgender; die gleichförmig beschleunigte Bewegung ist demnach eine solche, bei der die Geschwindigkeitszunahmen in gleichen Zeiten gleich groß sind, die nach der Fallzeit t erlangte Geschwindigkeit v also der Zeit proportional ist ($v = gt$). Galilei hatte zunächst Proportionalität zwischen Geschwindigkeit und Fallstrecke

angenommen, diese Annahme aber verworfen, weil aus ihr vermeintlich folge, daß dann die größten Fallstrecken in derselben Zeit wie die kleinsten zurückgelegt würden, mithin zum Fallen überhaupt keine Zeit erforderlich sei, also ein offenbarer Widerspruch mit den Tatsachen (in Wahrheit folgt aus $\frac{ds}{dt} = gs$ oder $\frac{ds}{s} = gdt$; durch Integration $l(s) = gt + C$). Die nunmehr gefundene richtige Beziehung stieß freilich zunächst auch noch auf ein Bedenken. Ihr gemäß muß nämlich ein fallender Körper eine unendliche Anzahl kleinster, allmählich anwachsender Geschwindigkeitsgrade durchlaufen, ehe er eine merkliche Geschwindigkeit erlangt, und hierzu ist anscheinend eine unendliche Zeit erforderlich, während erfahrungsgemäß recht bald eine erhebliche Geschwindigkeit vorhanden ist. Mit Recht aber hebt Galilei hervor, daß der unendlichen Teilbarkeit des Raumes die der Zeit parallel gehe und jeder Geschwindigkeitsgrad nur einen verschwindend kleinen Zeitteil beibehalten werde. Wir drücken dies in der Zeichensprache der Differentialrechnung durch die Gleichung $\frac{ds}{dt} = v$ aus, die mit $v = gt$ zusammen durch Integration sofort in $s = \frac{gt^2}{2}$ den Zusammenhang zwischen der Fallstrecke s, der Fallzeit t und dem Geschwindigkeitszuwachs g in der Zeiteinheit (Beschleunigung) liefert. Dieser Weg stand Galilei noch nicht offen. Er vollzieht die Integration auf ähnliche Weise wie Keppler bei der Ableitung seines 1. Gesetzes. Trägt man die vom Anfang der Bewegung an gezählten Zeiten als Abszissen auf einer Strecke von der Länge t auf, so lassen sich die nach Verlauf dieser Zeiten erlangten Geschwindigkeiten als die zugehörigen Ordinaten, also als Lote in den Endpunkten jener Abszissen auf ihnen darstellen. Die zur Abszisse t selbst gehörige Ordinate wird v, und wegen $v = gt$ müssen sämtliche

Endpunkte der Ordinaten auf der Verbindungsgerade des Koordinatenanfangspunktes mit dem Endpunkt der Ordinate v liegen. Der Inhalt des so gebildeten rechtwinkligen Dreiecks mit den Katheten t und v läßt sich als Summe sämtlicher Geschwindigkeitsgrade auffassen, die der fallende Körper in der Zeit t durchlaufen hat. Dieser Inhalt ist $\frac{tv}{2} = \frac{g}{2}t^2$, also gleich dem eines Rechtecks mit den Seiten t und $\frac{v}{2} = \frac{g}{2}t$. Der Inhalt eines solchen Rechtecks aber kann der vorigen Überlegung entsprechend als die Summe der gleichbleibenden Geschwindigkeiten $\frac{v}{2}$ betrachtet werden, die ein Körper besitzt, wenn er sich während der Zeit t mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegt. Damit hat Galilei die in Theorem I. Propos. I der Discorsi des 3. Tags niedergelegte Zurückführung der gleichförmig beschleunigten Bewegung auf die gleichförmige gewonnen: „Die Zeit, in welcher irgendeine Strecke von einem Körper von der Ruhelage aus mittelst einer gleichförmig beschleunigten Bewegung zurückgelegt wird, ist gleich der Zeit, in welcher dieselbe Strecke von demselben Körper zurückgelegt würde mittelst einer gleichförmigen Bewegung, deren Geschwindigkeit gleich wäre dem halben Betrage des höchsten und letzten Geschwindigkeitswertes bei jener ersten gleichförmig beschleunigten Bewegung." Wird also bei einer gleichförmigen Bewegung in der Zeit t mit der Geschwindigkeit $\frac{v}{2} = \frac{g}{2}t$ die Strecke s zurückgelegt, so wird bei einer gleichförmig beschleunigten Bewegung in derselben Zeit t die gleiche Strecke s durchmessen. Da aber bei einer gleichförmigen Bewegung die Geschwindigkeit $\frac{v}{2}$ durch den Weg in der Zeiteinheit dargestellt wird, so muß sich in t Zeiteinheiten der Weg $s = \frac{v}{2}t = \frac{g}{2}t^2$ ergeben: „Wenn ein Körper von der

Ruhelage aus gleichförmig beschleunigt fällt, so verhalten sich die in gewissen Zeiten zurückgelegten Strecken wie die Quadrate der Zeiten" (Theorem II. Propos. II.). Hieraus folgt schließlich, wenn man die Differenzen der aufeinanderfolgenden Quadrate der natürlichen Zahlenreihe bildet, daß sich die in aufeinanderfolgenden gleichen Zeiten zurückgelegten Fallstrecken wie die ungeraden Zahlen verhalten, was, wie Galilei betont, niemand vor ihm bewiesen hat.

Jetzt kann das Experiment zur Erhärtung der Prinzipien herangezogen werden; bestätigt es die Formel $s = \frac{g}{2} t^2$, so ist damit auch die Ausgangsformel $v = gt$ als richtig erwiesen. Das Fehlen von genauen Zeitmessern zwang zum Verzicht auf Experimente mit frei fallenden Körpern; Galilei hat allerdings derartige Versuche angestellt, aber wohl nur zur Widerlegung der Aristotelischen Ansicht von der Proportionalität zwischen Fallgeschwindigkeit und Gewicht und zum Beweis seiner am 1. Tage der Discorsi eingehend erörterten Behauptung, daß alle Körper bei Beseitigung des Luftwiderstandes gleich schnell fallen würden. Die Fallgesetze prüft er, um langsamere Bewegungen zu erhalten, mit Hilfe der allgemein bekannten Fallrinne. Zur Ausmessung der Zeit diente ein Eimer voll Wasser mit einer engen Öffnung am Boden, durch die sich ein feiner Wasserstrahl in einen Becher ergoß; das aufgesammelte Wasser wurde auf einer sehr genauen Wage gewogen, die Differenzen der Wägungen ergaben die Verhältnisse der Zeiten. Das Gesetz $s = \frac{g}{2} t^2$ fand sich „bei wohl hundertfacher Wiederholung" und für jede Neigung der schiefen Ebene bestätigt.

Selbstverständlich erforderte diese Methode, die an die Stelle des freien Falls eine zwangläufige Bewegung setzte, um beweiskräftig zu sein, eine gründliche Untersuchung

der durch die Abänderung des natürlichen Vorgangs herbeigeführten Folgen. Die wesentlichste Einsicht, daß auch beim Fall längs beliebig geneigter Ebenen die Geschwindigkeit der Zeit proportional ist, hat Galilei jedenfalls gewonnen, indem er in Gedanken den Neigungswinkel einer Ebene von gegebener Länge zwischen den Grenzen 90° und 0° variierte und erkannte, daß dadurch an der Natur der Bewegung als einer gleichförmig beschleunigten nichts geändert werde und sich nur der Betrag der Beschleunigung ändere. Galilei bestimmte aber auch die Größe der Kraft, die einen Körper auf einer schiefen Ebene abwärts treibt (Scholium zu Theorem II Propos. II) als Bruchteil des Gewichts dieses Körpers und erfaßte damit die bewegende Kraft als besondere Erscheinungsform des Druckes bzw. Zuges. „Es ist klar", sagte er, „daß die Tendenz eines Körpers zum Fall so groß ist, wie der Widerstand oder wie die geringste Kraft, die hinreicht, den Fall zu verhindern und den Körper in Ruhe zu erhalten." Auf einer schiefen Ebene von der Länge l ruhe ein Körper vom Gewichte L, der durch Vermittlung eines parallel zu l gespannten und über eine am höchsten Punkte der schiefen Ebene angebrachten Rolle gelegten Fadens ein neben der Höhe h der schiefen Ebene hängendes Gewicht H trage. Eine Bewegung von L die Strecke l hinauf läßt sich zusammengesetzt denken aus einer Bewegung längs der Basis der schiefen Ebene und längs ihrer Höhe h. Bei jener ist, wie schon im Dialog erörtert wurde, kein Widerstand zu überwinden, da die Entfernung vom Erdmittelpunkt sich nicht ändert. Der Widerstand wirkt also nur der Bewegung längs h entgegen. Er wird gemessen durch H, und H muß den Weg l senkrecht abwärts zurücklegen, wenn sich G dem Widerstande entgegen um die Strecke h hebt. Überhaupt verhält sich bei jeder noch so kleinen Verschiebung der verbundenen Körper G und H

die Strecke, die G der Schwere entgegen zurücklegt, zu der Strecke, die H fallend durchmißt, wie h : l. Schon im Dialog wird bei Erörterung der Schleuderbewegung, als Ergebnis einer Untersuchung der Gleichgewichtsbedingungen an der Schnellwage, erwähnt, „daß das kleinere Gewicht den Widerstand des größeren dadurch besiegt, daß es sich bedeutend, das andere hingegen nur unbedeutend bewegt" (Dialog 2. Tag). Hier überwindet also das kleinere H das größere L dadurch, daß die von jenem bei einer mit dem System verträglichen Bewegung zurückgelegte Strecke sich zu der zugehörigen Strecke von L verhält wie l : h. Wir erhalten folglich $Hl = Gh$. Da nun H die Bewegung von G auf der schiefen Ebene abwärts gerade aufhebt, also die Kraft mißt, die das Gewicht G parallel zu l abwärts treibt, ist diese Kraft nunmehr durch die Gleichung $H = \frac{h}{l} G$ ($H = G \sin \alpha$, wenn α der Neigungswinkel der schiefen Ebene ist) bestimmt. Die ganze Überlegung offenbart sich uns als eine Anwendung des Prinzips der virtuellen Verrückungen und als eine erste Ahnung von der Bedeutung des Arbeitsbegriffs für die Dynamik.

Die Darstellung der bewegenden Kraft durch das Produkt aus Masse und Beschleunigung kennt Galilei freilich noch nicht. Es bleibt ihm daher auch versagt, aus der gefundenen Beziehung diejenige zwischen der Beschleunigung beim freien Fall und der längs der schiefen Ebene zu entdecken und damit ein Mittel zur Feststellung der Schwerbeschleunigung g zu finden. Auch fehlt ihm noch die Erkenntnis von der Veränderlichkeit der Größe g, das Gravitations-Kraftfeld der Erde ist ihm ein durchaus homogenes, so daß F. Poske in seinem bekannten Lehrbuch der Physik für ein solches Feld geradezu den Namen „Galileisches Kraftfeld" vorschlagen konnte.

Die weiteren Betrachtungen Galileis über die Bewegung auf der schiefen Ebene bringen eine Fülle von interessanten Sätzen, die heutzutage leider fast vergessen sind. Erwähnt sei nur noch Theorem VI Propos. VI: „Wenn von dem höchsten Punkte oder von dem Gipfel eines Kreises nach dem Horizonte hin geneigte Ebenen bis zur Kreisperipherie errichtet werden, so sind die Fallzeiten längs derselben einander gleich."

Erst der 4. Tag der Discorsi beschäftigt sich mit der Wurfparabel, genauer der Wurflinie bei horizontalem Wurf. Hier begegnen wir zum ersten Male in der Geschichte der Mechanik der Zusammensetzung einer gleichförmigen und einer gleichförmig beschleunigten Bewegung. Zwei Einsichten sind es, aus deren Zusammenwirken diese schöne Entdeckung entspringt, die eine ist das schon mehrfach erwähnte Galileische Beharrungsgesetz, daß ein auf horizontaler Ebene sich widerstandsfrei bewegender Körper in gleichförmiger Bewegung verbleibt, die andere das bereits für den freien Fall verwendete Unabhängigkeitsprinzip, aus dem hier geschlossen wird, daß die sich gleichförmig erhaltende Transversalbewegung und die sich gleichzeitig behauptende beschleunigte Fallbewegung sich gegenseitig „zwar mengen, aber nicht stören, ändern und hindern." Gegenüber den Bedenken Simplicios, der wegen Vernachlässigung des Luftwiderstandes in Galileis Ableitungen, die Möglichkeit der Bewährung der bewiesenen Sätze durch praktische Versuche für sehr unwahrscheinlich hält, weist Salviati darauf hin, daß ein Holz- und Bleistab von gleicher Größe bei einem Fall aus bedeutender Höhe eine weit größere Geschwindigkeit erlangen, als sie einem horizontal geworfenen Körper erteilt werde (ausgenommen die Feuerwaffen); da aber jene mit kaum merklich verschiedener Geschwindigkeit auf der Erde anlangten, müsse bei solchen

mäßigen Geschwindigkeiten der Luftwiderstand sehr gering sein, könne daher recht wohl außer Rechnung bleiben. Daß auch der Luftwiderstand bei großer und bei kleiner Geschwindigkeit nicht erheblich verschieden sei, schließt Galilei aus den von ihm entdeckten Isochronismus der Pendelschwingungen; ein Versuch mit zwei an zwei gleichlangen Fäden aufgehängten Bleikugeln, deren eine „um einen Bogen von 80 Grad oder mehr, die andere um 4 oder 5" erhoben wird, lehrt zwei Sätze, „daß nämlich große und kleine Schwingungen stets in gleichen Zeiten erfolgen, und daß der Widerstand der Luft bei großer und kleiner Geschwindigkeit gleichen Einfluß ausübt." Beim Wurf wird also die Abweichung von der Parabel jedenfalls bei passend gewählten Versuchsbedingungen ganz unmerklich sein.

Die Aufgabe, in den einzelnen Punkten einer gegebenen Wurfparabel die Geschwindigkeiten zu bestimmen, veranlaßt Galilei zur Mitteilung eines eigentümlichen Maßes der Geschwindigkeit, das sich jeder leicht vorstellen kann. Da nach seiner Ansicht beim freien Fall „überall auf der Erde die Geschwindigkeiten in gleicher Weise wachsen", so wird man z. B. beim senkrechten Fall eines einpfündigen Bleistabes durch die Höhe einer Elle für seine Endgeschwindigkeit stets und überall denselben Wert erhalten. Die Geschwindigkeit irgendeiner gleichförmigen Bewegung läßt sich daher allgemein verständlich durch die Angabe ausdrücken, wie hoch ein Körper senkrecht herabfallen muß, um jene Geschwindigkeit zu erlangen; sie ist bekanntlich so groß, daß bei der gleichförmigen Bewegung der mit ihr begabte Körper in einer der Fallzeit gleichen Zeit die doppelte Fallstrecke zurücklegt. Wir messen gerade umgekehrt alle Geschwindigkeiten durch die Geschwindigkeit einer gleichförmigen Bewegung. Das cel ist aber sicher bei weitem nicht so anschaulich wie das Galileische Geschwindigkeitsmaß, das sich

ja ohne weiteres ganz korrekt fassen ließe, wenn man als Einheit der Geschwindigkeit die Endgeschwindigkeit eines aus 1 m Höhe über dem Meeresniveau auf 45° Breite im luftleeren Raume fallenden Körpers definierte.

Außer der Form der Wurflinie leitet Galilei unter anderem die beiden wichtigen Sätze ab, daß man den weitesten Wurf bei einem Neigungswinkel der Wurfrichtung gegen die Horizontale von 45° erhält, und daß die „Wurfweiten von Körpern, die bei gleichen Impulsen unter Neigungswinkeln abgesandt werden, die gleich viel vom halben Rechten abweichen," einander gleich sind. Sagredo ruft begeistert aus: „Erstaunlich und entzückend ist die Wucht zwingender Beweise, und so sind die mathematischen allein geartet. Ich kannte schon nach Aussage der Bombenwerfer die Tatsache, daß von allen Kanonen- oder Mörserschüssen die unter einem halben Rechten abgeschossene Kugel am weitesten fliegt; sie nennen es den sechsten Punkt des Winkelmaßes. Aber das Verständnis des inneren Zusammenhanges wiegt unendlich viel mehr, als die einfache Versicherung anderer, und selbst mehr als der häufig wiederholte Versuch."

Die letzten Worte charakterisieren die ganze naturwissenschaftliche Forschungsmethode Galileis. So wenig wie Coppernicus und Keppler beobachtende Astronomen im strengen Sinne des Wortes waren, so wenig kann Galilei als Vertreter der eigentlichen Experimentalphysik gelten. Wohl bediente er sich des Experiments mit Erfindungsgabe und Geschick, aber es hatte bei ihm nur in seltenen Fällen heuristische Bedeutung, es diente ihm nicht zur Entdeckung von neuen Wahrheiten, sondern zur Bestätigung anderweitig gewonnener Erkenntnisse. „Sein Verdienst liegt nicht so sehr in der experimentellen Feststellung der Gesetze, als in der gedanklichen Analyse der Erscheinungen" (Poske). Eine von tiefer philosophischer Bildung, gründ-

lichem Wissen und aufmerksamer Beobachtung des natürlichen Geschehens gestützte und geleitete geniale Intuition führte ihn bei der Mehrzahl seiner Untersuchungen von vornherein auf den richtigen Weg. „Wenn man," sagt er im Dialog, „nach den unbekannten Gründen der Tatsachen forscht, muß man das Glück haben, sich von Anfang an mit seiner Untersuchung auf der Straße der Wahrheit zu bewegen." Mit weit- und tiefschauendem Geiste überblickt er alle Folgerungen, die sich aus seinen Annahmen und Voraussetzungen ergeben und benutzt mit größtem Geschick die Mathematik zur Erlangung und klaren und deutlichen Formulierung naturwissenschaftlicher Erkenntnis. „Wer naturwissenschaftliche Fragen ohne Hilfe der Geometrie behandeln will, unternimmt etwas Unausführbares" (Dialog). Die Geometrie ist ihm „das mächtigste Werkzeug zur Schärfung des Verstandes, das uns zu jeglicher Untersuchung befähigt. Wie hatte doch Plato Recht, wenn er allem zuvor seine Schüler gründlich in der Mathematik unterrichtete!" (Discorsi). Die auf diesem Wege erlangten Erkenntnisse sind um so bewundernswerter, je unvollkommener die Mittel waren, die von der Mathematik dem Forscher damals dargeboten wurden; war doch weder die analytische Geometrie noch die Infinitesimalrechnung erfunden! Man kann im Hinblick auf diese Leistungen Galilei als Vater der theoretischen Physik bezeichnen. Das Ziel, aus wenigen allgemein gültigen Sätzen die ganze Wissenschaft abzuleiten, schwebte ihm deutlich vor Augen, und er hat als erster gezeigt, wie man sich ihm zu nähern vermöge.

In der Deduktion war Galilei ein Meister, die auf planmäßig angestellte Versuche sich stützende Induktion lag ihm ferner. Daraus erklärt sich, daß er in manchen Fragen, in denen er dicht vor der richtigen Einsicht stand, das Pflücken der reifen Frucht seinen Schülern und unmittelbaren Nach-

folgern überlassen mußte. Ein lehrreiches Beispiel bietet die ihm versagt gebliebene Entdeckung des Luftdruckes. Er hatte Versuche zur Bestimmung des Luftgewichts ersonnen und ausgeführt, er kennt die Beobachtung von Brunnenmachern, daß Saugpumpen das Wasser nicht höher als 18 Ellen heben, er gibt ein Experiment zur Herstellung und zur Messung der Kraft eines Vakuums an, er hält der alten Lehre vom horror vacui, dem Abscheu der Natur vor dem leeren Raume, den Einwand entgegen, daß doch unmöglich ein Vakuum, das bei einem Vorgange erst entstehen soll, also etwas gar nicht Vorhandenes, eine Wirkung ausüben könne und beruhigt sich doch wieder selbst, indem er Simplicio auf des Aristoteles Satz hinweisen läßt: „Die Natur unternimmt nichts zu tun, was zu geschehen sich sträubt (Discorsi, erster Tag).“ Erst Galileis Schüler Torricelli gab 1643 die Idee zu dem nach ihm benannten Barometerversuch an, den Viviani sofort ausführte.

Wenn wir Galilei an mancher irrigen Anschauung der Vergangenheit festhalten, in manchen Punkten unsicher zwischen Überlieferung und neuen Ideen hin- und herschwanken sehen, so wird er uns damit nur zum lebendigen Zeugen für die ungeheure Macht der Tradition. Die Einflüsse des Unterrichts und der Umgebung, der Sprache und der überkommenen Begriffsprägungen sind für die große Menge die eifrig ergriffenen Ariadnefäden, an denen sie sich in den labyrinthischen Irrgängen des Lebens und dem verwirrenden Chaos der Sinneseindrücke zurechttasten, — dem Genius sind sie Fesseln, die er da und dort zu lockern, aber nimmer völlig zu zerreißen vermag. Führende Geister schleudern wohl die prometheische Fackel weit hinaus in das vor der Menschheit liegende Dunkel; aber das Grundgesetz bleibt in der Welt des Geistes wie in der Natur die Entwicklung.



Isaac Newton

NSchB 4: Keferstein, Große Physiker.

4. Newton.

„In keinem andern Geiste haben die demonstrative und die induktive Fähigkeit in solch höchster Vortrefflichkeit und vollkommener Harmonie zusammen bestanden."
Macauley, die Geschichte Englands II, 161.

Am 22. Juni 1633 hatte Galilei im Dominikanerkloster Santa Maria sopra Minerva zu Rom in Gegenwart der Kardinäle und Prälaten des heiligen Offiziums „die falsche Meinung, daß die Sonne der Mittelpunkt der Welt und unbeweglich und die Erde nicht der Mittelpunkt sei und sich bewege," abgeschworen, verflucht und verwünscht. Ein „Und sie bewegt sich doch!" hätte den 69jährigen Greis dem Feuertode überliefert; unverbrüchliches Schweigen über die verpönte Lehre war ihm für den Rest seines Lebens auferlegt und wurde von ihm gehorsam innegehalten. Der Kampf zwischen der Coppernicanischen Weltansicht und der katholischen Kirche war äußerlich zugunsten dieser entschieden. Aber als Galilei 1642 die schon längst des Lichtes beraubten Augen schloß, da hätte er ausrufen dürfen: exoriare aliquis nostris ex ossibus ultor, aus meinem Gebein wird mir ein Rächer entstehn. Denn im gleichen Jahre wurde zu Woolsthorpe, in der englischen Grafschaft Lincoln Isaac Newton (gest. 1727 in London) geboren, und unter der Regierung Jacob II., des Königs, dem das heiße Bemühen, England in den Schoß der alleinseligmachenden Kirche zurückzuführen, die Krone kostete, erschienen seine philosophiae naturalis principia mathematica, die mathematischen Prinzipien der Naturlehre, durch die das von Coppernicus errichtete Gebäude seine Krönung und Voll-

endung und eine innere Festigung erfuhr, an der jeder Angriff zerschellen mußte.

Die Erstellung der Rudolfinischen Tafeln auf Grund der Kepplerschen Gesetze und die Erfindung und Vervollkommnung des Fernrohrs ermöglichte den Astronomen eine erhebliche Steigerung der Schärfe von Rechnung und Beobachtung. Die Tychonischen Beobachtungen hatten sich noch in einer Fehlerbreite von 2′ bewegt, mit der fortschreitenden Verbesserung der Instrumente sank dieser Spielraum auf Sekunden herab. Zwischen den nach den Kepplerschen Gesetzen errechneten und den wirklich beobachteten Örtern der Planeten ergaben sich infolgedessen merkliche Unterschiede; die sogenannten Störungen des Planetenlaufs traten immer deutlicher in die Erscheinung. Kepplers Reformation der Astronomie wurzelte wesentlich in der Unmöglichkeit, zu seiner Zeit einen Beobachtungsfehler von 8′ zuzulassen, wie das Coppernicus noch unbedenklich getan hatte; aber es ist sehr unwahrscheinlich, daß ihm seine Entdeckungen gelungen wären, wenn die zu seiner Verfügung stehenden Messungen bis auf Sekunden gestimmt hätten. Jetzt lag eine ernstliche Gefährdung seiner Ergebnisse nicht mehr vor. Die Abweichungen, die als Störungen empfunden wurden, drängten wohl zu einer Erklärung, aber bezeichnenderweise fanden Vorschläge, wie der von Cassini, die Kepplersche Ellipse durch eine andere krumme Linie zu ersetzen, kaum irgendwelche Beachtung; zeigte sich doch, daß trotz periodischer und säkularer Veränderungen aller übrigen Bahnelemente die großen Achsen der von den Planeten beschriebenen Ellipsen sich dauernd unverändert erhielten.

Wenn aber auch die Feststellungen Kepplers kaum bestritten wurden, so konnten sie doch als abschließendes Ergebnis nicht gelten. Herkunft und Fassung ließen ihre rein

empirische Natur deutlich hervortreten. Es waren Regeln, die eine recht genaue Beschreibung der Erscheinungen gaben und von denen sich der praktische Astronom ähnlich leiten lassen konnte, wie ein Schüler beim Übersetzen in eine Fremdsprache von den Regeln der Grammatik, aber es fehlte ihnen die Weihe des Gesetzes, das Merkmal der Notwendigkeit und Allgemeingültigkeit. Eine solche Einsicht ist nur durch Zurückverfolgen eines Satzes in seine Quellen zu erlangen. Gelingt seine Ableitung aus einem umfassenderen Prinzip, so ist damit seine Vereinzelung aufgehoben; er hört auf, ein bedeutungsloses buntes Steinchen zu sein, er fügt sich in das Mosaikbild unserer gesamten Weltauffassung ein. Wie weit er dabei den Anschein der Willkürlichkeit abstreift, das hängt davon ab, bis zu welchen Tiefen sich seine Wurzeln verfolgen lassen.

In den Naturwissenschaften geschieht die Einfügung der einzelnen Wahrnehmung in das Gewebe des Ganzen wesentlich durch ihr Erfassen als Wirkung und die Verknüpfung von dieser mit einer bereits anderweitig bekannten Ursache. Ein mächtiges, ja unentbehrliches Werkzeug ist hierbei die Mathematik. Die unanfechtbare Sicherheit, mit der sie aus gegebenen Gleichungen neue ableitet, überträgt sich unwillkürlich auf die Deutung des Geschehens, wenn es gelingt, dieses in mathematische Formeln zu fassen. Die Kepplerschen Regeln besaßen bereits die mathematische Form; es handelte sich darum, mit Hilfe des Kausalitätsgedankens ihren rein beschreibenden Charakter dynamisch umzudeuten, also den Bewegungsvorgang auf Kraftwirkungen zurückzuführen, und auf Grund dieser Umdeutung eine neue zusammenfassende Formulierung zu gewinnen, die nunmehr jene drei Sätze als verschiedene Erscheinungsformen eines einzigen Gesetzes verständlich machte. Selbstredend mußte von vornherein als der sicherste Prüfstein für

die Richtigkeit eines solchen umspannenden Prinzips die Möglichkeit angesehen werden, auf ihm eine Störungstheorie aufzubauen, die alle Veränderungen in den Elementen der Planetenbahnen aus demselben Grundgedanken zu begreifen lehrte, aus dem auch die ungestörten Bewegungen abzuleiten waren. Es ist das unsterbliche Verdienst Newtons, die angedeutete Aufgabe in ihrem vollen Umfange klar erfaßt, zu ihrer Bewältigung die mit der Differentialrechnung im wesentlichen identische Fluxionsrechnung ersonnen und ausgebildet und nicht nur die Grundzüge einer allgemeinen Lösung des Problems, sondern auch zahlreiche wichtige Einzelausführungen gegeben zu haben. Die betreffenden Untersuchungen sind in den 1687 in London erschienenen philosophiae naturalis principia mathematica enthalten, die gleichzeitig das erste umfassende Lehrbuch der Mechanik und das Vorbild für fast alle späteren Lehrbücher dieser Wissenschaft darstellen.

Die in diesem Werke niedergelegten und verwerteten Ideen waren durch die vorangegangene Entwicklung von Astronomie und Mechanik wohl vorbereitet, ja zum großen Teile bereits klar ausgesprochen. Schon Keppler hatte sich Vorstellungen über eine von der Sonne ausstrahlende Kraft gebildet, durch welche die Planeten um das Zentralgestirn herumgeführt würden. Von einem ganz anderen Standpunkte aus suchte Descartes die gleiche Frage durch seine berühmte Wirbeltheorie zu beantworten. Bullialdus knüpfte in seiner Astronomia Philolaica (1645), wenn auch wesentlich polemisierend, an Keppler an und hob hervor, daß dessen Sonnenkraft „wenn sie überhaupt existieren sollte, jedenfalls nicht im einfachen, sondern im quadratischen Verhältnisse mit der Entfernung abnehmen müsse“ (Rosenberger). Eine wichtige Etappe bezeichnet Alphonso Borellis Schrift Theoricae Mediceorum Planetarum (1666) insofern, als

hier dem Leser die mechanische Natur der Theorie der Himmelsbewegungen zum Bewußtsein gebracht und zugleich erkennbar wurde, daß es sich wesentlich um ein zweifaches Problem handle, nämlich um die mathematische Bestimmung der Zentrifugalkraft bei einer Zentralbewegung und des Gesetzes, nach dem die Planeten zur Vereinigung mit dem Zentralkörper streben. Hinsichtlich des zweiten Punktes ist namentlich Newtons Rivale in der Royal Society Hooke mindestens 13 Jahre vor dem Erscheinen der Mathematischen Prinzipien im Besitze klarer und anschaulicher Erkenntnisse gewesen; er hatte die Vorstellung einer allgemeinen Anziehungskraft der Materie gewonnen, er lehrte, daß die Gravitation mit der Entfernung von der Erde wie das Quadrat der Entfernung abnimmt und demonstrierte an einem konischen Pendel seine Idee von der Entstehung der elliptischen Bahnbewegung der Planeten durch ihre Abbeugung aus der allen Körpern von Natur zukommenden geradlinigen Bewegung infolge der Anziehung der Sonne. Über die gegenseitige Abhängigkeit von Zentralkraft und erzeugter Kurve vermochte er freilich wegen seiner geringen mathematischen Kenntnisse nichts zu ermitteln.

Auch die theoretische Mechanik hatte, als Newton an die Abfassung seines großen Werkes ging, bereits die Mehrzahl ihrer Prinzipien und Grundbegriffe festgelegt. Aus den Andeutungen Galileis war von dem Genueser Baliani eine allgemeine Fassung des Trägheitsgesetzes gewonnen worden; Galilei selbst hatte das Unabhängigkeitsprinzip mehrfach verwendet und mit voller Klarheit auseinandergesetzt, daß die Schwerkraft an bewegten Körpern eine Beschleunigung hervorruft. Eine sehr wertvolle Vorarbeit für die Newtonschen Untersuchungen bildete die Bestimmung der Größe der Zentrifugalkraft bei einer Kreisbewegung

durch Huygens im Horologium oscillatorium (1673), da man in dem Ausdruck $\frac{v^2}{r}$ für v, das zunächst die gleichbleibende Geschwindigkeit in der Kreisbahn bedeutet, nur die momentane Geschwindigkeit in einem Kurvenelement und für den Kreisradius r den Krümmungsradius dieses Elementes zu setzen brauchte, um den Wert der Zentrifugalkraft bei Bewegung in einer beliebig gekrümmten Bahn zu ermitteln; die in dieser Hinsicht noch zu überwindenden Schwierigkeiten waren also lediglich mathematischer Natur. Die Beweise für seine Sätze gab Huygens allerdings erst in der nachgelassenen Abhandlung „Über die Zentrifugalkraft" (1703).

Wir sehen aus der Beschaffenheit dieser voraufgehenden Leistungen, daß Newton in der Tat weniger neue physikalische als vielmehr mathematische Prinzipien aufzustellen hatte, der Titel seines Buches also mit weisem Bedacht gewählt erscheint. „Er leitete mit mathematischer Sicherheit aus einer Zentralkraft und einer dem Körper eingepflanzten geradlinigen Bewegung eine elliptische, parabolische oder hyperbolische Bahn und für die Bewegung in dieser Bahn die Gültigkeit der Kepplerschen Gesetze ab. Er deduzierte umgekehrt aus den Kepplerschen Gesetzen für alle Bewegungen der himmlischen Körper die Wirksamkeit einer Zentralkraft, die nach dem quadratischen Gesetz wirken muß. Er entwickelte weiter mit großer Genauigkeit aus der Annahme der so bestimmten Schwerkraft alle Eigentümlichkeiten der vielfach gestörten, d. h. durch die Anwesenheit anderer Planeten beeinflußten Bewegung des Mondes und der Planeten" (Rosenberger).

Auch die äußere Form des Werkes ist ganz die eines mathematischen Kompendiums. In drei Büchern, die in zahlreiche Abschnitte, Sektionen, zerfallen, baut es auf



Christian Huygens

Definitionen und Axiomen ein scheinbar unangreifbares System von mathematisch bewiesenen Lehrsätzen und daraus fließenden Folgerungen auf. Es ist unmöglich, in diesem festgefügten Bau die Herkunft der einzelnen Steine zu ermitteln, Newton gewährt uns keinen Einblick in die Entstehung und Entwicklung seiner Gedanken. Selbst Zweck und Ziel der Arbeit sind oft verschleiert. In der Vorrede erklärt der Autor allerdings, daß er sich wesentlich mit der Schwerkraft, der elastischen Kraft, dem Widerstand von Flüssigkeiten und sonstigen derartigen anziehenden oder antreibenden Kräften beschäftigen wolle; in den allgemeinen Lehrsätzen des ersten und zweiten Buches erforsche er aus den Bewegungserscheinungen die Naturkräfte und umgekehrt aus diesen jene; im dritten Buche gebe er eine Anwendung durch Erklärung des Weltsystems. Hier nämlich, so führt er aus, werden aus den Erscheinungen am Himmel „die Gravitationskräfte (vires gravitatis) abgeleitet, vermöge derer die Körper zur Sonne und den einzelnen Planeten streben. Dann werden aus diesen Kräften ebenfalls durch mathematische Sätze die Bewegungen der Planeten, Kometen, des Mondes und Meeres gefunden“. Aber es ist augenscheinlich, daß diese Anwendung, dies exemplum, Kern, Zweck und Ziel des ganzen Werkes ist, wenn auch Newton die grundlegenden Sätze ganz ohne Hinweis auf dieses Ziel in größter Allgemeinheit faßt und behandelt, z. B. bei der Herleitung der Bahn eines Körpers aus der auf ihn wirkenden Kraft die allerverschiedensten Kraftgesetze betrachtet.

Das erste Buch beschäftigt sich in der Hauptsache mit der Ermittlung des Kraftgesetzes bei der Zentralbewegung in gegebener Kurve und mit dem umgekehrten Problem. Die Aufgabe wird zunächst unter der Annahme eines festen Zentrums der Anziehung und eines einzelnen angezogenen

Körpers gelöst. Nachher (Sectio XI) betont aber Newton, daß dieser Fall wohl kaum jemals verwirklicht sei; vielmehr enthalte sowohl Kraftzentrum wie auch angezogener Körper immer bewegliche Materie und anziehende Kräfte; die Wechselseitigkeit der Anziehung bewirke dann eine Drehung der vorhandenen Körper um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, der entweder ruhe oder sich gleichförmig auf einer geraden Linie bewege. Newton untersucht demgemäß nun die Bewegung von zwei oder mehr Massenpunkten, die sich wechselseitig mit beliebigen Kräften anziehen. Ein den 11. Abschnitt des ersten Buches beschließendes Scholium leitet mit der wichtigen Bemerkung, daß man die Anziehung eines Körpers vernünftigerweise als Summe anziehender Kräfte seiner einzelnen Teile zu betrachten haben werde, zur Ermittlung der Gesamtanziehung sphärischer Körper aus den Einzelanziehungen der sie zusammensetzenden Teile über. Es wird nachgewiesen, daß für im umgekehrten quadratischen Verhältnis der Entfernung stehende Zentralkräfte der Einzelteile eine homogene Vollkugel auf einen äußeren Punkt mit einer Kraft wirkt, die der Masse der Kugel direkt und dem Quadrat der Entfernung des Punktes vom Kugelmittelpunkt indirekt proportional ist, also so, als ob ihre ganze Masse im Mittelpunkt vereinigt wäre. Die vorher für materielle Punkte unter Voraussetzung des umgekehrt quadratischen Kraftgesetzes abgeleiteten Sätze sind hiernach ohne weiteres auf solche Vollkugeln übertragbar. Der letzte Abschnitt des ersten Buches gibt eine Anwendung der in die Ferne wirkenden Anziehungskräfte auf die Brechung und Beugung des Lichtes, dessen Strahlen gemäß der von Newton hier und später vertretenen Emanationstheorie als Ströme von Lichtkörperchen angenommen werden, wenn er auch nur von einer Analogie zwischen der Fortpflanzung von Lichtstrahlen und der fortschreitenden Bewegung von

Körpern spricht, „in eine Erörterung aber über die Natur der Strahlen (ob sie Körper sind oder nicht) durchaus nicht eintreten will“ (erstes Buch Sectio 14, 365. Scholium).

Die Erfahrungsgrundlagen der in diesen Abschnitten behandelten Sätze sind zunächst in den drei Bewegungsgesetzen, dem Beharrungsgesetz, dem Unabhängigkeitsgesetz und dem Wechselwirkungsgesetz zusammengefaßt. Das erste konnte Newton, wie erwähnt, fertig übernehmen; er führte in seiner Formulierung allerdings eine Neuerung ein, indem er Zustandsänderungen eines Körpers nur durch äußere Kräfte bedingt sein ließ, also etwaige Bewegungswiderstände auch als solche Kräfte faßte. Es ist das scheinbar nebensächlich, kennzeichnet aber Newtons Neigung, mathematische Abstraktionen in physikalische Begriffe zu verwandeln; Widerstände bringen, wie wirkliche Kräfte, Geschwindigkeitsverluste hervor, sie lassen sich also als entgegengesetzt gerichtete Geschwindigkeiten betrachten und mathematisch durch die Ausdrücke für die diese Geschwindigkeiten erzeugenden Kräfte in die Rechnungen einführen, und so werden sie Newton zu tatsächlichen Kräften. Das Unabhängigkeitsgesetz bzw. den Satz vom Kräfteparallelogramm hat erst Newton deutlich auf seine allgemeinste Form gebracht. Dasselbe gilt von dem Prinzip der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung, gegen dessen von Newton behauptete Allgemeingültigkeit in neuester Zeit allerdings schwerwiegende Bedenken erhoben worden sind (Poske); für Newton selbst kam in der Hauptsache nur die wechselseitige Anziehung von Massen in Betracht, für die das Gesetz sicher zutrifft. Besonders wichtig ist die von Newton aufgestellte Definition des Massenbegriffs, durch welche die Masse zum ersten Male klar vom Gewichte unterschieden wurde. Die Masse oder Menge der Materie wird durch das Produkt aus ihrer Dichte und Größe gemessen (quantitas

materiae est mensura ejusdem orta ex illius densitate et magnitudine conjunctim). Sie wird aus dem Gewicht eines jeden Körpers gefunden, dem sie nach genauen, von Newton angestellten Pendelversuchen proportional ist. Die Newtonsche Massendefinition ist als eine Zirkelerklärung oft bemängelt worden, und selbstverständlich mit Recht, wenn man unter Dichte die Masse der Volumeneinheit versteht. Bei Newton liegt aber die Auffassung zugrunde, daß alle Materie aus durchweg gleichen kleinsten Teilen zusammengesetzt ist, die nur durch mehr oder weniger große Zwischenräume getrennt sind. Ist die Dichte die Anzahl solcher Teilchen in der Volumeneinheit und kann diese Anzahl wenigstens vergleichsweise für alle Stoffe bestimmt werden, was unter Voraussetzung der Newtonschen Hypothese z. B. durch das spezifische Gewicht möglich ist, so ist die Erklärung Newtons jedenfalls so weit zulässig, wie seine Annahme über die Konstitution der Materie. Endlich ist noch die vierte Definition der Prinzipien bedeutungsvoll, nach der eine äußere Kraft die auf einen Körper ausgeübte Wirkung zur Änderung seines Zustandes der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung in gerader Linie ist (vis impressa est actio in corpus exercita, ad mutandum ejus statum vel quiescendi, vel movendi uniformiter in directum), denn sie enthält in ihrem zweiten Teile die Kennzeichnung jeder Kraft als eines Beschleunigung hervorrufenden Umstandes. „Unleugbar hat erst diese Definition die ganze Fülle der Veränderungen, die an den Bewegungen beobachtet werden, der mathematischen Behandlung zugänglich gemacht" (Poske). Zu beanstanden ist aber der Zusatz Newtons zu seiner Kraftdefinition: „Diese Kraft ist nur in der Wirkung vorhanden und beharrt nicht nach der Wirkung im Körper. Denn ein Körper beharrt in jedem neuen Zustande nur durch die Trägheitskraft (per solam vim inertiae)." Der im

Trägheitsgesetze ausgesprochenen Tatsache wird bereits durch das Auftreten der Masse in der Kraftgleichung $k = mb$ (Kraft = Masse mal Beschleunigung) Rechnung getragen, die Annahme einer besonderen Trägheitskraft oder eines Beharrungswiderstandes neben der Masse ist überflüssig.

Das zweite Buch der Prinzipien behandelt die Bewegungen in widerstehenden Mitteln. Die Mitteilung einer Reihe messender Versuche über die Größe solcher Widerstände gegen schwingende Pendel und fallende Körper in verschiedenen Mitteln belebt den etwas spröden und mathematisch schwer faßbaren Stoff. Berühmt ist die hier gegebene erste theoretische Ableitung der Schallgeschwindigkeit c in freier Luft aus der Formel $c = \sqrt{e:d}$, wo e den Elastizitätsmodul und d die Längendichte der Luft bedeutet. Sie liefert einen viel zu kleinen Wert, den Newton durch allerlei gekünstelte Annahmen auf den richtigen zu heben sucht. Erst viel später zeigte Laplace, daß dem Radikanden als Faktor das Verhältnis der beiden spezifischen Wärmen bei konstantem Druck und konstantem Volumen hinzuzufügen ist, weil bei der Fortpflanzung in den Verdichtungen und Verdünnungen der Luft Temperaturänderungen auftreten, von denen die Elastizität des Trägers der Bewegung im Sinne einer Erhöhung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit beeinflußt wird. Der Zusammenhang des zweiten Buches mit dem Hauptproblem des Werkes tritt erst am Schlusse hervor, wo Newton die Wirbelbewegungen in Flüssigkeiten ausgesprochenermaßen zu dem Zwecke erforscht, um festzustellen, ob sich die Himmelsbewegungen durch Wirbel erklären lassen. Indem er hierbei zu einem negativen Ergebnisse gelangt, tritt er in offenen Gegensatz zu der bis dahin fast allgemein angenommenen Wirbeltheorie des Descartes, die in dem entstehenden Kampfe infolge ihrer unpräzisen und der

mathematischen Behandlung schwer zugänglichen Form schließlich unterlag.

Die tiefgehenden Verschiedenheiten in der Auffassung des Naturgeschehens bei den streitenden Parteien enthüllen sich erst, wenn man den Begriff der Newtonschen Gravitation genauer ins Auge faßt. Im dritten Buche der Prinzipien, das die in den beiden ersten Büchern erlangten mathematischen Ergebnisse auf die Probleme der Astronomie anwendet, werden als Richtschnur vier Regeln aufgestellt. „Es sollen erstens an Ursachen zur Erklärung natürlicher Dinge nicht mehr zugelassen werden, als wahr sind und zur Erklärung der Erscheinungen ausreichen. Danach schon soll man zweitens, so weit es angeht, gleichartigen Wirkungen dieselben Ursachen zuschreiben. Drittens sind diejenigen Eigenschaften der Körper, welche weder verstärkt noch vermindert werden können, und welche allen Körpern zukommen, an denen man Versuche anstellen kann, für Eigenschaften aller Körper zu halten." Genauer kommen diese Eigenschaften, Ausdehnung, Härte, Undurchdringlichkeit, Beweglichkeit und Trägheitskraft den kleinsten Teilen der Körper zu. „Auch die Schwere muß als eine Eigenschaft aller Teilchen der Körper, die wir kennen, angesehen werden. Sind nämlich alle Körper in der Umgebung der Erde gegen diese schwer, und zwar im Verhältnis der Mengen der Materien in jeder; ist der Mond gegen die Erde im Verhältnis seiner Masse, und umgekehrt unser Meer gegen den Mond schwer; hat man ferner durch Versuche und astronomische Betrachtungen erkannt, daß alle Planeten wechselseitig gegeneinander und wie auch die Kometen gegen die Sonne schwer sind: so muß man nach der letzten Regel auch behaupten, daß alle Körper gegen einander schwer sind." In der 3. Auflage freilich fügt Newton den diesen Ausspruch abschwächenden Zusatz hinzu, daß er hier-

mit die Schwere, die ja mit der Entfernung von der Erde abnehme, nicht als eine wesentliche Kraft der Materie hinstellen wolle; es gelte als vierte Regel: „In der Experimentalphysik muß man die aus den Erscheinungen durch Induktion erschlossenen Sätze so lange entweder genau oder sehr nahe für wahr halten, bis andere Erscheinungen eintreten, durch welche sie entweder größere Genauigkeit erlangen oder Ausnahmen unterworfen werden. Dies muß geschehen, damit nicht das Argument der Induktion durch Hypothesen aufgehoben werde" (nach Rosenberger). Auch sonst hat Newton wiederholt durchblicken lassen, daß er die Gravitation zunächst nur als einen Ausdruck für das tatsächliche Verhalten der Körperwelt zum Zwecke der mathematischen Darstellung des wirklichen Geschehens einführe, ihr eigentliches Wesen und ihre Ursache aber dahingestellt sein lasse. In den Schlußsätzen der Prinzipien sagt er sogar ausdrücklich: „Ich habe bisher die Erscheinungen der Himmelskörper und die Bewegungen des Meeres durch die Kraft der Schwere erklärt, aber ich habe nirgends die Ursache angegeben. Diese Kraft rührt von irgendeiner Ursache her, welche bis zum Mittelpunkt der Sonne und der Planeten dringt, ohne irgend etwas von ihrer Wirksamkeit zu verlieren. Sie wirkt nicht nach Verhältnis der Oberfläche, sondern nach Verhältnis der Masse fester Materie, und ihre Wirkung erstreckt sich nach allen Seiten hin bis in ungeheure Entfernungen, indem sie stets im quadratischen Verhältnis der letzteren abnimmt. Ich habe noch nicht dahin gelangen können, aus den Erscheinungen den Grund dieser Eigenschaften der Schwere abzuleiten, und Hypothesen erdenke ich nicht (Hypotheses non fingo)."

Andrerseits aber sprechen mannigfache direkte Äußerungen Newtons, wie auch solche, die von ihm inspiriert oder mindestens gutgeheißen worden sind, dafür, daß dieser

theoretisch und öffentlich zumeist festgehaltenen Darstellung seiner Ansichten doch eine private Überzeugung von der Gravitation als einer allen materiellen Teilchen eigentümlichen und ohne Vermittlung eines materiellen Mediums unmittelbar in die Ferne wirkenden Kraft zugrunde lag. Da er die Annahme eines Äthers ausschließen zu müssen glaubte, blieb ihm nichts anderes übrig, als an eine spirituelle Übertragung der Wirkungen durch den allmächtigen Willen des im Raume überall gegenwärtigen Gottes zu glauben. Er wurde in dieser Meinung durch das scheinbare Verschwinden von Bewegungsgrößen beim Zusammenstoß absolut harter, unelastischer Körper bestärkt; er übersah die hier auftretende Verwandlung von Massenbewegungen in intramolekulare Bewegungen, die Umwechslung von großem Geld in kleines (nach Leibnizens treffendem Ausdruck) oder würdigte sie doch nicht in ihrer vollen Bedeutung, war aber von der tatsächlichen Erhaltung der gesamten Bewegungsgröße in der Welt überzeugt und sah zur Rettung keinen anderen Ausweg, als beständig sich wiederholende Eingriffe des Schöpfers in den Weltenlauf.

Newtons Schule und die ganze folgende Generation der Physiker hat die Frage nach der Vermittlung der Fernwirkung der Gravitation bald ganz aus dem Gesichtskreis verloren; das ständige Arbeiten mit Fernkräften bei der Beschreibung der Erscheinungen und die daraus sich ergebenden Bequemlichkeiten der mathematischen Darstellung ließen die Schwierigkeiten des Begriffs in den Hintergrund treten; er verwandelte sich in eine gangbare Münze, um deren Herkunft man sich nicht zu kümmern brauchte.

Zunächst aber erhob sich aus dem Lager der Cartesianer, namentlich in Frankreich, ein heftiger Widerstand gegen die Newtonsche Auffassung, in der man eine Wiederbelebung aristotelisch-peripatetischer Lehren sah, eine Neueinführung

der verborgenen Eigenschaften der Dinge, die man eben erst glücklich aus der Physik entfernt hatte. Die kinetische und die dynamische Naturerklärung trafen hart aufeinander. Die Cartesianer wollten nur die Ableitung von Bewegungen aus Bewegungen gelten lassen, die Newtonianer führten alles Geschehen auf Kräfte zurück, unter denen die anziehenden, die sich nach Bedarf auch durch Null hindurch in abstoßende verwandelten, die wichtigste Rolle spielten. Die Kernfrage, wie die Wirkung eines Körpers auf einen anderen eigentlich vorzustellen sei, kann die eine Anschauung so wenig beantworten wie die andere; die Übertragung einer Bewegung bei unmittelbarer Berührung ist nicht begreiflicher als eine Wirkung in die Ferne. Aber wenn es sich bei aller Naturerklärung darum handelt, neue Erscheinungen auf bekannte und jedermann geläufige zurückzuführen, so ist die Überlegenheit der kinetischen Theorie über die dynamische nicht zweifelhaft. Sie trat daher auch wieder auf den Plan, sobald ihre theoretischen Grundlagen eine vollkommenere Ausbildung als zu Newtons Zeiten erlangt hatten, und nur die Gravitation hat sich bis zum heutigen Tage ihrer Betrachtungsweise noch nicht fügen wollen.

Schließlich zeigte Newton, wie sich aus der Voraussetzung der allgemeinen Massenanziehung und ihres Gesetzes die verwickeltsten Bewegungen im Planetensystem entwirren und der Rechnung unterwerfen lassen. Der zweite Abschnitt des dritten Buches behandelt die für die Schiffahrt überaus wichtigen Mondungleichheiten, im dritten wird aus den Anziehungen von Sonne und Mond, ihren Massen und Entfernungen die Größe von Ebbe und Flut ermittelt, im vierten das Maß des Vorrückens der Nachtgleichen mathematisch aus der Theorie bestimmt, im fünften werden die Kometenbahnen als Parabeln dem Sonnensystem eingefügt.

Newton hat prinzipiell die Mechanik des Himmels zum Abschluß gebracht. Er hat ihre wesentlichsten Aufgaben klar erfaßt und die Grundlagen für ihre Lösung gegeben, wenn er auch diese Lösung schon wegen des gewaltigen Umfangs der Arbeit nicht überall selbst zu leisten vermochte. Mit vollem Rechte durfte J. Kant 1755 in seiner allgemeinen Naturgeschichte und Theorie des Himmels rühmen, daß „unter allen Aufgaben der Naturforschung keine mit mehr Richtigkeit und Gewißheit aufgelöst worden, als die wahre Verfassung des Weltbaues im Großen, die Gesetze der Bewegungen und das innere Triebwerk der Umläufe aller Planeten; als worin die Newtonsche Weltweisheit solche Einsichten gewähren kann, dergleichen man sonst in keinem Teile der Weltweisheit antrifft." Die weiteren Fortschritte der Astronomie bestanden in der zunehmenden Erschließung der Tiefen des Weltraumes, namentlich auch durch Entdeckung neuer Planeten und Monde. Die Errechnung des Ortes und der Bahnelemente des noch von keinem Menschen geschauten äußersten Planeten aus den Störungen des Uranus durch Leverrier und Adams ist einer der schönsten Triumphe der Mathematik und zugleich eine glänzende Bestätigung der Theorie Newtons. Die Kenntnis der physischen Beschaffenheit der Himmelskörper gewann eine ganz unerwartete Sicherheit durch die Entwicklung der Spektroskopie auf Grund der Forschungsergebnisse von Fraunhofer, Kirchhoff und Bunsen. Und noch bevor alle diese Resultate erreicht waren, unternahm es Kant 1755, die Entstehung des Plantensystems, ja die Bildung des ganzen Kosmos aus dem Chaos begreiflich zu machen. Der Raum, in dem der Umlauf der Planeten um die Sonne und die Bewegung der Monde um ihren Planeten stattfindet, ist leer; Newton konnte daher keine materielle Ursache der bestehenden Ordnung verstatten, er mußte in ihr das unmittelbare Eingreifen

der Hand Gottes erblicken. Kant nennt diesen Verzicht auf weitere Untersuchung einer von den einfachen Grundgesetzen noch weit entfernten Beschaffenheit eine für einen Philosophen „betrübte Entschließung“, bei der er sich nicht zu beruhigen vermag. Im jetzigen widerstandsfreien leeren Raum bleibt die Bewegung erhalten, deren Entstehung nur in dem mit Materie erfüllten möglich war. Aller Stoff des Systems breitete sich ursprünglich in aufgelöster Form durch den ganzen Raum aus, den das System gegenwärtig einnimmt. Die einzelnen materiellen Teilchen waren mit den Newtonschen anziehenden und mit abstoßenden Kräften begabt, wie sie bei den gasförmigen Körpern ja wohlbekannt sind. Diese Kräfte stuften sich in den mannigfachsten Graden ab. Die Ruhe konnte deshalb auch nur einen Augenblick dauern. Die dichteren Teile mußten sofort zu Anziehungskernen werden, unter denen der zuerst gebildete und mächtigste den Keim für die Sonne abgab. Die zu ihren Anziehungspunkten sinkenden Materien wurden durch die zwischen ihnen wirkenden Abstoßungskräfte von der geradlinigen Bewegung seitwärts gelenkt, und der senkrechte Fall schlug in Kreisbewegungen aus, die den Mittelpunkt der Senkung umfaßten, zunächst also den Kern der Sonne umwirbelten. Anfänglich durchschnitten sich diese Kreise in den mannigfaltigsten Richtungen. „Indessen sind diese auf mancherlei Art untereinander streitenden Bewegungen natürlicherweise bestrebt, einander zur Gleichheit zu bringen, das ist in einen Zustand, da eine Bewegung der anderen so wenig als möglich hinderlich ist.“ So wandern schließlich alle Teilchen in gleicher Richtung in parallelen Kreisen, die beiderseits nur wenig von der Ebene des Sonnenäquators abweichen. Dann „ist der Streit und der Zusammenlauf der Elemente gehoben, und alles ist in dem Zustande der kleinsten Wechselwirkung“. In diesem großen

Wirbel müssen sich an verschiedenen Stellen stärkere Attraktionsmittelpunkte finden, von denen die umgebenden Teilchen abermals angezogen werden. Die dadurch gebildeten Massen der Planeten werden die Bewegungen der Elemente, aus denen sie gebildet wurden, „in eben dem Grade, nach eben derselben Richtung fortsetzen". Daß auch ihre Achsendrehung und die Kreisbewegung etwa entstehender Monde in dieser Richtung von West nach Ost erfolgt, erklärt sich aus der größeren Geschwindigkeit der sonnennahen Partikeln in ihren Wirbelbahnen; durch diesen Vorsprung vor den sonnenfernen Teilchen bestimmen sie bei der Vereinigung mit dem Planeten die Richtung von dessen Achsendrehung oder, wenn sie vor dieser Vereinigung die Kreisbewegung annehmen, die Richtung des Umlaufes für den dadurch gebildeten Mond.

Hier enthält die Hypothese Kants einen augenfälligen Fehler; denn aus der angeführten Ursache würde eine zur allgemeinen Kreisbewegung aller Materie parallel zum Sonnenäquator gerade entgegengesetzte Drehung der Planeten und ihrer Monde folgen. Kant hätte also vielmehr eine größere Lineargeschwindigkeit der sonnenfernen Teilchen voraussetzen und begründen müssen. — Eine solche ergibt sich, wenn man von vornherein eine gleichmäßige Drehung des Urnebels um eine Achse, die spätere Sonnenachse, annimmt; dann überwiegt in der Tat die Lineargeschwindigkeit der von der Achse entfernteren Teile die der näheren, wie bei einem sich drehenden Rade ohne weiteres ersichtlich ist. Laplace ging in seiner „Exposition du systeme du monde" (1796) von diesem gewissermaßen vorgeschritteneren Zustande des Chaos aus. Nach ihm erstreckte sich infolge außerordentlich großer Wärme die Atmosphäre der Sonne ursprünglich noch über die Planetenbahnen hinaus und zog sich erst nach und nach durch Abkühlung bis auf ihren



Immanuel Kant

gegenwärtigen Umfang zusammen. Dieser Vorgang war mit einer fortwährenden Zunahme der Drehungsgeschwindigkeit verbunden. Schließlich überwog in den äußersten Gebieten die Zentrifugalkraft die nach innen gerichtete Anziehung und infolgedessen lösten sich an den jeweiligen Grenzen in der Nähe des Sonnenäquators frei schwebende und um die Sonne sich drehende Dunstringe ab. Diese zerrissen fast immer in zu Kugeln sich ballende Massen und bildeten so die Planeten und deren Monde.

Der immer mehr zunehmenden Kenntnis unseres Planetensystems gegenüber ist es indessen nicht möglich, die Hypothesen von Kant und Laplace festzuhalten. Namentlich die in großer Zahl neu entdeckten Monde und Planetoiden bilden teils durch ihre außerordentlichen Umlaufsgeschwindigkeiten, teils durch die starken Exzentrizitäten ihrer Bahnen, teils endlich durch die Rückläufigkeit ihrer Bewegung wichtige Instanzen gegen jene Theorien. Vom Standpunkt der jetzigen Gastheorie aus scheint sogar die Möglichkeit sowohl des von Kant als auch des von Laplace angenommenen Urzustandes ausgeschlossen. Ebenso wenig können die neueren Kosmogonien von Poincaré, Moulton, Arrhenius, See und anderen Forschern als endgültige Lösungen des Problems gelten. Das in der Entwicklung der Wissenschaft immer deutlicher in die Erscheinung tretende Streben des menschlichen Geistes, das Gewordene aus seinem Werden zu begreifen, wird sich freilich durch solche Mißerfolge nicht unterdrücken lassen. Aber wenn schon die Erklärung der Entstehung des in seinem Bewegungsmechanismus und in seiner physischen Zusammensetzung mit unübertroffener Klarheit vor unseren Augen liegenden Planetensystems aus einem ungeformten Urzustand auf immer neue Hindernisse stößt, so sollte uns dies gegenüber den Versuchen, die Entwicklung der so viel weniger durchsichtigen organischen

Natur aus einfachsten Anfängen abzuleiten, zu gesteigerter kritischer Behutsamkeit stimmen und uns davor bewahren, für feststehende Wahrheit zu nehmen, was nur als tastendes Suchen nach der Wahrheit Berechtigung und Bedeutung besitzt.

Die „mathematischen Prinzipien der Naturlehre" zeigen uns Newton vorwiegend als theoretischen Physiker; nur gelegentlich tritt er uns hier auch als Experimentator entgegen. Das astronomische Beobachtungsmaterial, dessen er bedurfte, um die Fruchtbarkeit und Tragweite seiner mathematischen Analyse der Zentralbewegung in der Anwendung auf die Bewegungsvorgänge am Himmel darzutun, war in ausreichendem Maße vorhanden; er hat es allerdings gelegentlich erst durch die dem Genie bei Verfolgung seiner höchsten Ziele eigene Rücksichtslosigkeit zu seiner Verfügung erhalten können; die überaus wertvollen Messungen des Königlichen Astronomen der Greenwicher Sternwarte Flamsteed wurden teilweise gegen dessen Willen auf Newtons Betreiben dem Druck übergeben. Selbst die außerordentliche Begabung und der nimmer ermüdende Fleiß eines Newton, der zeitweilig die irdischen Bedürfnisse des Schlafs und der Nahrungsaufnahme kaum noch zu empfinden schien, hätten nicht vermocht, auch noch die für sein Riesenwerk der principia mathematica erforderlichen Beobachtungsdaten selbst zu erstellen.

Daß aber Newton das Experiment mit gleicher Meisterschaft zu handhaben vermochte, wie das Instrument der Mathematik, hat er auf dem Gebiete der Optik bewiesen. Vielleicht kann nur noch von Helmholtz gesagt werden, was Macaulay in seiner „Geschichte Englands" von ihm rühmt: „In Isaak Newton waren zwei Arten geistiger Kraft, welche wenig gemein haben und welche nicht oft in einem sehr hohen Grade von Stärke zusammen ge-



Pierre Simon Laplace

funden werden, welche aber nichtsdestoweniger in den höchsten Zweigen der Naturwissenschaften gleichmäßig notwendig sind, vereinigt, wie sie niemals vorher oder nachher vereinigt gewesen sind. Es mag Geister gegeben haben, die für die Pflege der reinen mathematischen Wissenschaften so glücklich angelegt waren, wie der seine; es mag Geister gegeben haben, die für die Pflege der reinen Experimentalwissenschaften ebenso glücklich angelegt waren; aber in keinem andern Geiste haben die demonstrative und die induktive Fähigkeit in solch höchster Vortrefflichkeit und vollkommener Harmonie zusammen bestanden" (Übersetzung von Bülau, 2. Bd., S. 161). Newton hat seine optischen Untersuchungen, deren wichtigstes Ergebnis die Erkenntnis der zusammengesetzten Beschaffenheit des weißen Lichts und die Erklärung der bei der Brechung, Interferenz und Beugung auftretenden farbigen Lichter, sowie der Körperfarben war, in den Abhandlungen A new Theory about Light and Colours (Philosophical Transactions I, 1672) und „Theorie des Lichtes und der Farbe" (ebenda 1675) und in dem umfassenden Werke Optics or a Treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light (1704) bekannt gemacht. Die erste dieser Schriften ist nicht nur deshalb besonders lesenswert, weil sie die grundlegende Entdeckung der Farbenzerstreuung enthält, sondern auch, weil sie die einzige Veröffentlichung Newtons ist, in der er den Gang seiner Forschung, Fehlschläge und Erfolge, gesicherte Versuchsergebnisse und daran geknüpfte Hypothesen in voller Unbefangenheit und Offenheit mitteilt, während er später dies ungemünzte Gold in eine streng mathematische Form umprägte, die in ihren Definitionen, Axiomen und Lemmas die Enttäuschungen und Freuden des ersten Suchens und Findens vollkommen verhüllte.

Newton erzählt in der in den Berichten der Royal Society abgedruckten Abhandlung, daß er sich 1666 — er war damals Lucasian-Professor in Cambridge — ein dreiseitiges Glasprisma angeschafft habe, um damit die berühmten Farbenerscheinungen zu untersuchen. In den Fensterladen seines verdunkelten Zimmers schnitt er eine kleine kreisrunde Öffnung zum Einlaß des Sonnenlichts und setzte sein Prisma so dahinter, daß das Licht nach der gegenüberliegenden Wand des Zimmers gebrochen wurde. „Es war", so sagt er, „zuerst eine angenehme Belustigung, die lebhaften und intensiven Farben zu betrachten, welche dadurch hervorgebracht wurden; als ich sie aber nach einiger Zeit sorgfältiger beobachtete, erstaunte ich, ihre Form länglich zu finden, während diese nach dem angenommenen Brechungsgesetz doch eine kreisförmige hätte sein sollen. Die Farben waren an den langen Seiten von geraden Linien begrenzt; an den Enden nahm das Licht so allmählich ab, daß es schwer hielt, die Figur des Bildes zu bestimmen, doch schien dieselbe hier halbkreisförmig zu sein. Beim Vergleichen der Länge dieses farbigen Spektrums mit seiner Breite fand ich die erstere fünfmal größer als die letztere, ein so starkes Mißverhältnis, daß mich das äußerst lebhafte Verlangen überkam, die Ursache desselben zu erforschen." Veränderungen der Größe der Öffnung im Laden, der Entfernung und der Lage des Prismas zu ihr und der Dicke des vom Lichte durchsetzten Glases führten keine wesentliche Abänderung der Erscheinung herbei. Sie konnte auch nicht etwa durch zufällige Unregelmäßigkeiten des Glases verursacht sein. Denn dann hätte sie durch ein zweites, hinter das erste gestelltes Prisma, welches das Licht in entgegengesetzter Weise brach, verstärkt werden müssen; statt dessen aber wurde hierdurch das Licht auf die kreisförmige Gestalt zurückgeführt. Die Vermutung, die

Verlängerung des Bildes möge durch die verschiedene Neigung der von verschiedenen Teilen der Sonne herrührenden Strahlen veranlaßt sein, ergab sich ebenfalls als unhaltbar. Seine Breite entsprach durchaus einem scheinbaren Sonnendurchmesser von 31′, seine Länge aber erforderte zur Erklärung aus jener Voraussetzung einen Durchmesser von 2° 49′. Das Brechungsgesetz ergibt nun, daß 2 Strahlen, die auf ein Prisma mit einem Richtungsunterschied von 31′ auftreffen, bei symmetrischem Durchgang mit dem gleichen Richtungsunterschied auch wieder austreten. Newton hatte die Richtigkeit jenes Gesetzes durch eigene Versuche hinlänglich festgestellt; er konnte eine Abweichung von 2° 18′ von der aus ihm zu folgernden Größe unmöglich auf eine Ungenauigkeit des Brechungsgesetzes zurückführen, so wenig wie einst Keppler den Tychonischen Beobachtungen einen Fehler von 8′ zuzuschreiben vermochte. Obenein zeigte sich, daß eine Drehung des Prismas um seine Achse, wodurch die Einfallswinkel des Lichtes um 4—5° geändert wurden, eine kaum merkliche Bewegung der Farben auf der Wand zur Folge hatte, also auch die Brechungsgrößen nicht merklich änderte. Nach der Descartesschen Lichttheorie und Beobachtungen an einem mit schiefem Raket zurückgeworfenen Ball ließ sich schließlich noch an eine krummlinige Bewegung des Lichts nach dem Durchgang durch das Prisma denken; aber die Versuche sprachen auch gegen diese Erklärung der Verlängerung des Spektrums. Newton sah sich an einem Kreuzwege, ungewiß, welche Richtung er einzuschlagen habe. Da mußte ein experimentum crucis (ein Versuch am Kreuzwege) die rechte Bahn weisen. Er setzte dicht hinter das erste Prisma einen Schirm mit kleiner Öffnung, stellte in größerem Abstande davon einen zweiten, ebenfalls mit einer kleinen Öffnung versehenen Schirm und dahinter

ein zweites Prisma auf. Durch Drehung des ersten Prismas wurden nach und nach alle Teile des Bildes durch die Öffnung des zweiten Schirms geführt. „Hierdurch sah ich dann", berichtet Newton, „daß das Licht, welches nach dem einen Ende des Bildes hin gerichtet war, nachdem die Brechung durch das erste Prisma geschah, in dem zweiten Prisma eine beträchtlich stärkere Brechung erlitt, als das Licht, welches nach dem andern Ende des Bildes hin lag. Und so entdeckte sich die wahre Ursache der Verlängerung des Bildes als keine andere, als daß das Licht in sich nicht ähnlich oder homogen ist, sondern aus verschiedenen Strahlen besteht, von denen die einen mehr, die andern weniger brechbar sind."

Weiter stellt nun Newton fest, daß ein bestimmter Grad der Brechbarkeit von Licht mit einer ganz bestimmten Farbe dieses Lichtes und umgekehrt die Farbe mit jener Brechbarkeit unabänderlich verbunden ist. Die Farben sind ursprüngliche und angeborene Eigenschaften, die in verschiedenen Strahlen verschieden sind, einem jeden Strahle aber mit seiner Brechbarkeit zusammen unveräußerlich zukommen. Es gibt eine unbestimmte Mannigfaltigkeit ursprünglicher Farben und Mischfarben. Weiß ist eine aus allen Farben in bestimmtem Verhältnis zusammengesetzte Farbe (eine Behauptung, die nicht vollkommen richtig ist, wie die Mischung von Komplementärfarben zu Weiß zeigt), macht man die prismatischen Lichter konvergent, so vermögen sie „aufs neue ein gänzlich reines, vollkommen weißes Licht" hervorzubringen.

Die Entstehung der Farben in fallenden Regentropfen ist von hier aus klar. Die Farben der natürlichen Körper haben keinen andern Ursprung, „als die verschiedene Fähigkeit der Körper, spezielle Arten von Licht in verschiedener Menge zu reflektieren." Die Farben sind also keine Eigen-

schaften der Gegenstände, in der Dunkelheit existieren sie nicht. Wohl aber wird das Licht selbst als eine Substanz, nicht als bloße Qualität, zu denken sein, zumal da es sich durch die vorangehenden Untersuchungen als ein aus höchst verschiedenartigen Bestandteilen zusammengesetztes Aggregat enthüllt hat.

Die zweite Abhandlung „Theorie des Lichtes und der Farben“ beschäftigt sich in ihrem, den Einzelerscheinungen zugewandten Teile mit den Farben dünner Platten und den sogenannten Newtonschen Farbenringen. Für dieses Gebiet hatte Hooke allerdings bereits sehr eingehende und vollständige Untersuchungen geliefert, und Newtons Verdienst bestand vorzugsweise in der Anstellung äußerst sorgfältiger Messungen. Sie waren so zuverlässig, daß nicht nur Newton selbst sie noch nach 30 Jahren unverändert in seine „Optik“ übernehmen konnte, sondern daß sogar noch im Anfang des Jahrhunderts 18 Thomas Young für die Berechnung der Wellenlänge des Lichts keine besseren Resultate zur Verfügung standen (nach Rosenberger).

In der Optik hat Newton die ganze Farbenlehre systematisch gründlich durchforscht und dargestellt. Nur das damals noch wenig bekannte Gebiet der subjektiven Farben ließ er unberührt. Gerade das aber wurde später das Untersuchungsfeld für Goethe. Die bis zur Erbitterung gesteigerte Heftigkeit, mit der Goethe Newton und die Newtonsche Schule angriff, und die völlige Nichtbeachtung, mit der diese ihm vergalt, beruht auf gegenseitigem Mißverstehen oder Nichtverstehen. Der Gegenstand der beiden Forscher war ein durchaus verschiedener, er verlangte durchaus verschiedene Behandlung, und die Ergebnisse mußten voneinander abweichen. Das erkannte aber weder Goethe noch die Anhängerschaft Newtons, und erst eine spätere Zeit (Helmholtz!) erfaßte, daß jede der beiden streitenden

Parteien etwas ganz anderes im Auge und jede für sich Recht gehabt, jeder aber das Verständnis des Gegners durchaus gefehlt hatte.

Im 1. Buch der Optik wandte Newton die von ihm über die Farbenzerstreuung gefundenen Ergebnisse auf die Theorie des Regenbogens an, deren Grundlagen im übrigen allerdings bereits anderweitig festgestellt waren; er bestimmt genau die Radien der einzelnen Farbenbögen und die Breite sowohl des Haupt- wie des Nebenregenbogens. Das 2. Buch behandelt die Farben dünner und dicker Platten, die bekannten Farbenringe, die entstehen, wenn man eine Bikonvexlinse auf die ebene Seite einer plankonvexen Linse oder eine plankonvexe Linse mit der konvexen Seite auf eine ebene Glasplatte drückt, und die natürlichen Farben der Körper. Das 3. Buch beschäftigt sich mit den Beugungserscheinungen. Auch hier fügt Newton den Entdeckungen Grimaldis nicht viel Neues hinzu; sein Verdienst besteht vielmehr wesentlich in gründlichen quantitativen Bestimmungen, — beiläufig benutzt er als abbeugenden Körper ein Menschenhaar — und in Anwendung seiner Lehre von der Farbenzerstreuung auch auf diese Erscheinungen.

Bei all diesen Untersuchungen zeigte sich Newton als scharfsinniger, geschickter und exakter Experimentator. „Die richtige Methode, die Eigenschaften der Dinge zu entdecken, ist die Ableitung derselben aus Experimenten“, schreibt er in einem Briefe an den Sekretär der Royal Society Oldenburg am 6. 7. 1672. Aber der Versuch war ihm nicht Selbstzweck, sondern stets nur Forschungsmittel; er betrieb das Experimentieren nicht als eine Art von wissenschaftlichem Sport, bei dem immer neue Anordnungen zur Aufdeckung desselben Sachverhalts ersonnen werden, hielt solche Häufung vielmehr für überflüssig. „Es ist nicht die Zahl der Experi-

mente“, sagt er in einem Briefe an den Lütticher Gelehrten Lucas, der aus einer Anzahl gut erdachter und durchgeführter Versuche gewisse Einwände gegen die Newtonsche Lehre von der Farbenzerstreuung entnommen hatte, „sondern ihr Gewicht, welches beachtet werden muß, und wenn eins genügen kann, wozu sind dann viele nötig?“ Wer die verschiedene Brechbarkeit des Lichtes feststellen will, der möge das experimentum crucis anstellen. Ist der durch dieses erbrachte Beweis richtig, „so bedarf es keiner weiteren Prüfung der Sache.“ Offenbar übersieht Newton bei dieser Anempfehlung einer gebundenen Marschroute, daß gerade die Abänderung einer Versuchsanordnung häufig zu einer vertieften Auffassung der Vorgänge, wohl auch zu neuen Entdeckungen führt. Er würde wahrscheinlich bei gründlicher Nachprüfung der Versuche von Lucas, der zufällig ein Prisma von geringerem Zerstreuungsvermögen als Newton benutzt hatte, zur Erkenntnis der verschiedenen Dispersionsfähigkeit verschiedener Glassorten und von da aus vielleicht zur Herstellung achromatischer Gläserkombinationen gelangt sein, die er von seinem Standpunkt aus für unmöglich hielt. Aus dieser Unterlassung einen Vorwurf herzuleiten, wäre freilich verkehrt. Es ist vielmehr eine der Wesenseigentümlichkeiten des Genies, seine Wege selbständig zu wählen und unbeirrt von seitab liegenden Einwirkungen zu verfolgen, ja solche Einflüsse als störend energisch fernzuhalten und abzuwehren.

Auf dem Gebiete der Optik ist Newton seinem angeblichen Grundsatze, Hypothesen nicht zu erdenken, noch weniger treu geblieben, als in der Mechanik des Himmels. Die Verwerfung des den ganzen Raum erfüllenden Äthers und die erfolgreiche Zurückführung der Vorgänge auf allen materiellen Teilchen eigentümliche Grundkräfte in den mathematischen Prinzipien der Naturlehre nötigte zu

feindlicher Stellungnahme gegenüber der von Hooke in der Micrographia (1665) und vor allen Dingen von Huygens mit mathematischer Schärfe in der Abhandlung über das Licht von 1678 entwickelten Undulationstheorie. Nach anfänglichem Schwanken ist Newton ein entschiedener Vertreter der Emissionstheorie geworden, die, ursprünglich ein Erzeugnis der naiven Auffassung des Sehvorgangs, von ihm und seiner Schule ihre wissenschaftliche Aus- und Durchbildung erhielt. Seine von der dynamischen Auffassung der Materie getragene Gegnerschaft gegen die Wellenlehre des Lichts wurde durch deren immerhin noch unzureichende Entwicklung in der damaligen Zeit verstärkt. Namentlich vermochte Huygens keine befriedigende Erklärung für die geradlinige Ausbreitung des Lichtes zu geben. Auch die Definition der Farben durch die Schwingungszahl, die in bestimmter Weise erst 1750 von Leonhard Euler aufgestellt wurde, war noch nicht gefunden. Newton nimmt also in seiner Optik an, allerdings unter Verhüllung in eine zur Erörterung gestellte Frage, daß die Lichtstrahlen aus sehr kleinen Körpern bestehen, die von der leuchtenden Substanz ausgesandt werden und sich durch ein gleichförmiges Mittel in gerader Linie bewegen. „Durchsichtige Substanzen wirken dann aus einiger Entfernung auf die Lichtstrahlen, indem sie sie brechen, zurückwerfen und beugen, und die Strahlen wirken umgekehrt auf die Substanzen, indem sie ebenfalls aus der Entfernung die Teile derselben erschüttern und damit erhitzen, und diese Aktionen und Reaktionen gleichen den Wirkungen einer anziehenden Kraft der Körper im stärksten Grade.“ Die violetten Strahlen bestehen aus den kleinsten, die roten aus den größten Körperchen, wodurch sich zugleich ihre verschiedene Brechbarkeit erklärt. Die Erscheinungen der Farbenringe und anderer Interferenzvorgänge nötigen zur Annahme

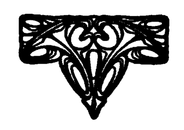
von Anwandlungen, fits of easy reflection or of easy transmission, der Lichtstrahlen, vermöge deren sie an regelmäßig in sehr kleinen Zwischenräumen aufeinander folgenden Stellen abwechselnd leichter reflektierbar oder leichter brechbar sind; jene Intervalle müssen für jede Farbe verschieden, am größten für Rot, am kleinsten für Violett sein. Indem Newton diese fits für verschiedenfarbige Lichtstrahlen maß, bestimmte er ersichtlich nach heutiger Auffassung die Wellenlängen verschiedenfarbiger Lichter, und wir haben hier einen belehrenden Beleg dafür, „wie man auch von verschiedenen, wahren oder falschen, Hypothesen aus die Naturerscheinungen mathematisch richtig beschreiben kann“ (Rosenberger).

Daß sich Newton und die an ihn anknüpfende Physik durch psychologische und logische Beweggründe unwiderstehlich dazu getrieben fühlte, die in der Mechanik zur Geltung gebrachte dynamische Auffassung der Natur auch in der Optik und weiterhin auf allen Gebieten der Naturlehre festzuhalten, ist leicht zu verstehen. Daß man bei der Durchführung dieser Anschauung auch vor einem gelegentlichen sacificrium intellectus, einem Verstandesopfer, nicht zurückschreckte, ist nicht minder begreiflich. Der Gewinn einer einheitlichen Naturanschauung ist für die Wissenschaft ein so heiß erstrebtes und doch so schwer zu erringendes Ziel, daß Anstöße auf der Bahn dahin kaum empfunden werden, wenn man nur im großen und ganzen den Weg innezuhalten vermag. Eine geradezu „ungeheuerliche“ Annahme sind die Anwandlungen der Lichtstrahlen. Denn wenn die Lichtkörperchen nach der Newtonschen Grundvorstellung ursprünglich mit unveränderlichen Grundkräften begabt sind, aus denen ihre verschiedene Wirkung auf die Teilchen der dichten Körper entspringt, so ist es unbegreiflich, wie diese Kräfte in einem aus völlig gleichen

Körperchen bestehenden Strahl in regelmäßigen Abständen einander entgegengesetzt, nämlich abwechselnd abstoßend und anziehend sein sollen. Ferner ist die ungestörte geradlinige Fortpflanzung der Lichtstrahlen weder im Weltenraum, wo sich unzählige Strahlen durchkreuzen, noch in den durchsichtigen Körpern, die doch sicher nicht von geradlinigen Kanälen durchzogen sind, nach der Emissionshypothese begreiflich zu machen. Endlich müßte in den selbstleuchtenden Körpern das beständige Ausschleudern von Lichtmaterie eine allmähliche merkliche Verarmung daran herbeiführen, wovon weder bei der Sonne noch bei den Fixsternen etwas zu merken ist. Nur allerlei unwahrscheinliche Hilfsannahmen konnten über solche Schwierigkeiten hinweghelfen. Diese Hilfshypothesen mußten sich mit dem Zuwachs an Erfahrungsmaterial, namentlich mit der fortschreitenden Kenntnis der Polarisationserscheinungen fortwährend vermehren. Solche „hilfeleistenden Hypothesen" erwecken aber jederzeit Verdacht gegen die Haupthypothese, „weil jede derselben an sich dieselbe Rechtfertigung bedarf, welche der zum Grunde gelegte Gedanke nötig hatte, und daher keinen tüchtigen Zeugen abgeben kann" (Kant, Kritik der reinen Vernunft).

Die anscheinend sturmfreie Burg der dynamischen Naturauffassung besaß in der Emissionstheorie eine Stelle von gefährlicher Schwäche. Hier erfolgte denn auch in der Tat der erste Einbruch der Gegner. Die lange zurückgedrängte Undulationstheorie drang endlich siegreich vor. Der geächtete Äther eroberte die verlorene Herrschaft wieder; der Glaube an unvermittelte Fernwirkungen wurde Schritt für Schritt aus dem Felde gedrängt. Von der Optik und fast gleichzeitig von der Wärmelehre aus verbreitete sich die kinetische Darstellung der Erscheinungen allmählich fast auf alle Gebiete der Physik. Zunächst freilich gab die

Autorität und der Erfolg Newtons der Physik für ein Jahrhundert ein eigentümliches Gepräge. Die Lehre von einer besonderen Lichtmaterie und jedem materiellen Teilchen in eigentümlicher und ursprünglicher Weise zukommenden anziehenden und abstoßenden Kräften führte von der Idee einer einheitlichen Beschaffenheit des Naturgeschehens, wie sie z. B. in den atomistischen Theorien vorlag, völlig ab und zersplitterte die Physik in eine Reihe nur lose zusammenhängender Einzelwissenschaften. Was in der Optik der Lichtstoff leistete, das mußte in der Kalor der Wärmestoff, in der Magnetik ein magnetisches und in der Elektrik ein elektrisches Fluidum vollbringen. Von der gewöhnlichen Materie unterschieden sich diese Stoffe sehr wesentlich durch die Eigenschaft der Gewichtslosigkeit oder wenigstens der Unwägbarkeit, weshalb sie unter dem Namen „Imponderabilien" zusammengefaßt wurden. Die Einsicht in die Unhaltbarkeit dieser Lehre entwickelte sich wesentlich an den Entdeckungen über die Verwandlungsmöglichkeiten der verschiedensten Naturkräfte ineinander. Das Gesetz von der Erhaltung der Energie wird der erste hypothesenfreie Ausdruck einer einheitlichen Auffassung des Naturgeschehens.



5. Faraday.

„Laßt der Phantasie, wenn sie durch Scharfsinn und Prinzipien geleitet wird, freien Lauf, aber haltet sie fest in Experimenten und leitet sie durch Experimente."
M. Faraday.

Gegen das Ende des Jahrhunderts 17 und im Beginne des Jahrhunderts 18 stand die Untersuchung elektrischer Vorgänge im Brennpunkte des Interesses der Physiker aller Länder. Durch die Entdeckung der Volta-Elektrizität war der Zugang zu einem Wunderland unerforschter Gebiete eröffnet worden; fast jeder Schritt hier enthüllte überraschende, neue Tatsachen, die eine völlige Umwälzung der physikalischen Grundbegriffe, ja der Auffassung des gesamten Naturgeschehens herbeiführten. Im Anschluß an Galvanis Versuche über elektrisch erregte Zuckungen von Froschschenkeln wurde die Elektrizität der Volta-Säule zunächst nur durch physiologische Wirkungen festgestellt und geprüft. Aber schon am 30. April 1800 zersetzten Carlisle und Nicholson mit Hilfe einer Säule aus 17 Plattenpaaren Wasser, und die Entdeckungen anderer chemischer Zersetzungen durch den galvanischen Strom folgten in kürzester Frist, so daß Davy und Berzelius, denen ein großer Teil jener Erfolge zu verdanken ist, die Ergebnisse alsbald zum Aufbau einer elektrochemischen Theorie verwerten konnten, nach der die elektrischen und chemischen Kräfte nur verschiedene Äußerungen einer einzigen Grundkraft sind. Van Marum, Simon und Pfaff brachten durch einen kräftigen Strom Metalldrähte zum Glühen und Schmelzen,



Michael Faraday

der Öffnungsfunke wurde beobachtet und noch vor 1812 erzeugte Davy mit dem aus 2000 Plattenpaaren bestehenden Trogapparat der Royal Institution in London das glänzende Kohlenlicht. Von ganz besonderer Wichtigkeit wurde die Entdeckung der magnetischen Stromwirkungen. Den Ausgangspunkt bildete hier die Oerstedtsche Beobachtung der Ablenkung der Magnetnadel im Jahre 1820, zu der Oerstedt bald den Nachweis fügte, daß auch umgekehrt ein beweglicher Stromleiter durch einen Magneten abgelenkt werde. Mit dem größten Erfolge war Ampère auf dem dadurch gewiesenen Arbeitsfelde tätig. Er fand die Anziehung gleichgerichteter, die Abstoßung entgegengesetzt gerichteter Ströme und die magnetischen Eigenschaften von Drahtspiralen (Solenoiden) und sah sich dadurch in den Stand gesetzt, alle magnetischen Erscheinungen auf elektrische Vorgänge zurückzuführen: ein Magnet besteht aus unmagnetischem Metall, dessen Moleküle von gleich gerichteten Strömen umkreist werden, die Erde selbst ist ein mächtiges Solenoid, in dem von Ost nach West galvanische Ströme fließen. Die Herstellung von Elektromagneten durch Sturgeon 1825 erschien als ein glänzendes Ergebnis und zugleich als eine schwerwiegende Bestätigung der Ampèreschen Theorie. Auf eine enge Beziehung zwischen Elektrizität und Magnetismus von zunächst freilich dunkler Art wies auch der von Arago 1824 und 1825 festgestellte Rotationsmagnetismus hin, die Dämpfung der Schwingungen einer Magnetnadel durch eine darunter liegende Kupferplatte und die Mitführung einer solchen Nadel im Kreise bei Rotation der Metallplatte. — Die Untersuchung der magnetischen Wirkungen des Stroms legte eine erste Bresche in den Bau der Lehre von den Imponderabilien. Die Annahme eines besonderen magnetischen Fluidums wurde durch die Ampèreschen Entdeckungen und Vorstellungen vollkommen

überflüssig und sinnlos; die magnetischen Kraftäußerungen ließen sich nicht mehr als Eigenschaften eines eigentümlichen Stoffes erklären. Ja, der Rotationsmagnetismus schien sogar die Möglichkeit der Erzeugung magnetischer Kräfte durch bloße Bewegung anzudeuten; die Ideen über Kraftverwandlung mußten durch ihn an Stärke und Entschiedenheit gewinnen. In der gleichen Richtung wirkte die Entdeckung der Thermoelektrizität durch Seebeck 1821, die eine theoretisch höchst wichtige Ergänzung durch den 1824 festgestellten Peltiereffekt erhielt, der die Umkehrbarkeit der Verwandlung von Wärme in Elektrizität erwies. Die Proteusnatur der Voltaelektrizität, die Möglichkeit, sie aus den verschiedensten Kräften zu gewinnen und wieder umgekehrt in die mannigfaltigsten Leistungen umzusetzen, führte bald zu weiteren bedeutsamen Fortschritten auf diesem Gebiete der Kräfteverwandlung. Einer der hervorragendsten Pfadfinder hierbei war Michael Faraday (geb. 1791 in Newington Butts bei London, gest. 1867 zu Hampton Court bei London).

Unter den großen Männern, von denen die Kulturgeschichte berichtet, ist Faraday eine der anziehendsten Persönlichkeiten. Unbedingte Hingabe an die Wissenschaft ist ein Grundzug seines Wesens, aber dieses Verhältnis hat nichts vom Charakter einer dienstbaren Abhängigkeit an sich; es bewegt sich in den vertraulichen Beziehungen des Kindes zur Mutter, die jenem die Verkörperung vollendeter Schönheit und höchster Vollkommenheit ist. Die Verehrung Faradays für wissenschaftliche Darstellungen erwuchs und erstarkte durch das Lesen von Büchern, die dem dürftig vorgebildeten, aber klugen und aufgeweckten Buchbinderlehrling zum Einbinden übergeben waren. Der „Wunsch, wissenschaftlich beschäftigt zu sein, sei es auch auf der niedrigsten Stufe“, erfüllte ihn, wie er in einer hinter-

lassenen Aufzeichnung berichtet, bald ganz und wurde nach dem Anhören von vier Vorlesungen, die Sir Humphry Davy in der Royal Institution in London hielt, zum brennenden Verlangen gesteigert. Nur so auch meinte er kleinlichem Gezänk, Eifersucht und Neid entgehen zu können; er bildete sich ein, daß die Wissenschaft „ihre Anhänger ebenso liebenswürdig und edelsinnig" mache, „wie sie das Handwerk böse und selbstsüchtig werden" lasse. Die Enttäuschung blieb freilich nicht aus. „Als ich das Geschäft verließ", erzählte er einer Besucherin, „und die Wissenschaft zur Laufbahn wählte, dachte ich, ich habe all die Geringfügigkeiten und kleinlichen Eifersüchteleien, die einen Mann an seinem moralischen Fortkommen hindern, hinter mir gelassen, aber ich fand mich nur in eine andere Sphäre versetzt, um auch dort ebenso wie überall die armselige menschliche Natur anzutreffen, die denselben Schwächen und derselben Selbstsucht unterworfen war, wie hoch auch ihr Geist stehen mochte." Dabei malte sich tiefe Traurigkeit in seinem Gesichtsausdruck. Den Grund für solche betrübende Erscheinungen sah er in dem Streben der Forscher nach Ruhm; die unvermeidliche Folge sei „immer ein Schatten von Neid und Bedauern im Gemüt" und damit auch eine Herabsetzung der Fähigkeit zu wissenschaftlichen Entdeckungen. Diese Erfahrung erschütterte aber doch nicht seine Überzeugung, daß die aufrichtige Hingabe an die Wissenschaft zu einer Höhe des Menschentums führe, die durch äußere Ehrungen kaum zutreffend gewürdigt werden könne. Geradezu unpassend für diesen Zweck erschien ihm die Erhebung in den Adelsstand, die „den Mann, der einer von zwanzig oder vielleicht von fünfzig war, unter hundert andere" versetze. Die Männer der Wissenschaft „haben sich ihren Platz errungen, ob die Allgemeinheit es anerkennt oder nicht", will man ihnen Aus-

zeichnungen verleihen, so sollten diese „wünschenswert und beneidenswert in den Augen der Geburtsaristokratie gemacht werden, doch für alle, ausgenommen für die Aristokratie der Wissenschaft, unerreichbar sein". Er selbst pries sich glücklich, kein „Sir" zu sein, und so hoch er die ihm verliehenen Ehrendiplome wissenschaftlicher Gesellschaften schätzte, so wenig Wert legte er auf den materiellen Besitz goldener Medaillen; jene wurden sorgfältig in einem Diplombuche aufgezogen und verzeichnet, diese bewahrte er in einer einfachen Holzschachtel auf. Nie erniedrigte er die Wissenschaft zur melkenden Kuh, die ihn mit Butter zu versorgen hatte. Mit Leichtigkeit hätte er durch seine Kenntnisse und Fähigkeiten ein großes Einkommen und Zutritt zu der Geselligkeit der höchsten Kreise seines Landes erlangen können; auf beides verzichtete er zugunsten seiner persönlichen wissenschaftlichen Freiheit. Er übersah und unterschätzte keineswegs den praktischen Nutzen der Wissenschaft; 30 Jahre lang war er wissenschaftlicher Berater (Scientific adviser) am Trinity House, „dessen Angestellten die offizielle Ausübung des Leuchtturmdienstes in Großbritannien obliegt", und bis zum Jahre 1830 übernahm er häufig chemische Analysen und die Abgabe von Sachverständigen-Gutachten. Auch deutet er in seinen Schriften bisweilen auf die Möglichkeit technischer Verwertungen seiner Forschungsergebnisse hin, und es ist kaum zu bezweifeln, daß sein erfinderischer Geist auf diesem Gebiete Erfolge errungen haben würde. Aber die freie wissenschaftliche Forschung stand ihm höher als dies alles, und je älter er wurde, um so entschlossener verzichtete er auf jeden Seitenweg, der ihn zeitweilig von seinem Ziele abführte, mochte er auch noch so lockende Aussichten bieten. „Er suchte immer mehr nach Grundlagen, als nach Anwendungen, mehr nach neuen Tatsachen zum Nutzen der Wissenschaft,

als nach kaufmännisch zu verwertenden Erfindungen" (Silvanus Thompson).

Faradays Hochachtung für die Wissenschaft äußerte sich aber nicht nur darin, daß er seine ganze Manneskraft in den Dienst der Erforschung der Wahrheit stellte; auch die Darbietung der Ergebnisse der wissenschaftlichen Arbeit in öffentlichen Vorträgen sollte der Würde des Gegenstandes angemessen sein. Dazu rechnete Faraday nicht nur eine gründliche sachliche, namentlich experimentelle Vorbereitung, sondern auch eine möglichst vollendete Form der Darstellung. Er hat sich über die an einen Redner, der Vorlesungen für das große Publikum hält, zu stellenden Anforderungen schon als Jüngling ausführlich ausgesprochen; zu seiner eigenen Vervollkommnung in der Kunst der Rede besuchte er trotz seiner bedrängten pekuniären Verhältnisse einen Abendkursus über Beredsamkeit und lange Zeit hindurch ließ er von einem befreundeten Zuhörer alle Fehler im Vortrage und in der Aussprache niederschreiben, die er bei seinen Morgenvorlesungen beging. Über seine Macht als Redner sagt de la Rive: „Er wirkte in wahrem Sinne des Wortes faszinierend auf seine Zuhörer, und wenn er sie in die Geheimnisse der Wissenschaft eingeweiht hatte, so beendigte er seine Vorlesung, wie es seine Gewohnheit war, indem er sich zu Regionen erhob, die weit über Materie, Raum und Zeit erhaben waren, und dann teilte sich die Bewegung, die er empfand, auch denen mit, die seinen Worten lauschten, und ihr Enthusiasmus kannte keine Grenzen mehr." Dabei gab er sich keineswegs einer Überschätzung des Wertes öffentlicher Vorträge hin. Zum Sekretär der Royal Institution äußerte er einmal: „Vorlesungen, die wirklich lehrreich sind, werden nie populär sein, und Vorlesungen, die populär sind, werden niemals wirklich lehrreich sein." Er erwartete

von populären Vorträgen nicht mehr als eine anregende und wegweisende Wirkung unter der Voraussetzung von Ernst und Gründlichkeit beim Vortragenden und von Aufmerksamkeit und regem Wissensdrang beim Zuhörer.

Angeborener Takt bewahrte Faraday vor Annahme der unliebenswürdigen Eigenschaften, mit denen der Autodidakt und self-made-man sich oft von der übrigen Menschheit ab- und ausschließt. Auch die Eifersucht auf wissenschaftliche Mitarbeiter, von der der große Newton nicht frei zu sprechen ist, lag ihm fern. Eifrig und willig erkannte er fremde Verdienste an. „Es ist wundervoll", schrieb er an Tyndall, „wieviel Gutes dabei herauskommt, wenn verschiedene Personen an derselben Sache arbeiten. Jeder einzelne hat Ansichten und Ideen darüber, die den andern neu sind. Wenn die Wissenschaft eine Republik ist, gewinnt sie." Bescheiden bezeichnet er es als seine eigene Aufgabe, „an dem großen Werke der Entfernung zweifelhafter Kenntnisse mitzuarbeiten. Solche Kenntnisse bilden das frühe Dämmerungslicht in jeder fortschreitenden Wissenschaft und sind wesentlich für deren Entwicklung; allein der, welcher sich bemüht, das Trügerische in derselben zu zerstreuen und das Wahre deutlicher ans Licht zu ziehen, ist ebenso nützlich an seinem Platze und ebenso notwendig in dem Fortgang der Wissenschaft als der, welcher zuerst in die intellektuelle Finsternis einbricht und zuvor unbekannte Bahnen zur Erkenntnis aufschließt" (E. R. 876). Stets ist er bemüht, die Arbeiten anderer über die Gegenstände seiner eigenen Untersuchungen möglichst vollständig anzuführen und zu charakterisieren; mehrfach bittet er in seinen Schriften um Entschuldigung, wenn ihn seine zunehmende Gedächtnisschwäche jemanden vergessen ließ, ja, er weist auf die Möglichkeit hin, daß ihm unbekannt gebliebene Veröffentlichungen vorhanden sein könnten, welche

die Bekanntmachung seiner Ansichten unnötig machen würden (E. R. 482). „Wenn er die Entdeckungen anderer seinen Hörern vortrug, so schien ein Zweck und einer allein, alles zu bestimmen, was er sagte und tat, und das war der, ohne Lob und ohne Kritik sein äußerstes für den Erfinder zu tun" (Bence Jones, Leben und Briefe von Faraday).

In Kämpfen über das Urheberrecht an einer neuen wissenschaftlichen Feststellung war er allerdings sehr empfindlich, wenn er auch solche Prioritätsstreitigkeiten an sich verabscheute und einmal als „den großen Flecken" bezeichnete, „mit dem das schöne Gebäude der wissenschaftlichen Wahrheit behaftet ist". „Arbeite, beendige, veröffentliche" war sein Rat an einen jungen Gelehrten, um ihn vor derartigen Verwicklungen zu schützen. Im übrigen hält er Meinungsverschiedenheiten in der Wissenschaft für ganz nützlich, „da dies veranlaßt, die Tatsachen genauer zu erforschen" (Zusatz zur 21. Reihe der E. R.).

Wie Kepplers, so hatte auch Faradays Art der wissenschaftlichen Forschung einen künstlerischen Charakter. Er fühlte, welchen Weg er zu gehen habe und „gelangte zu seinen Schlüssen durch ein Etwas, das mehr Ahnung als direkte Wirkung von Vernunftschlüssen war" (S. Thompson). Helmholtz hebt hervor, wie es im höchsten Grade merkwürdig sei, zu sehen, „welch eine große Zahl umfassender Theorien, deren methodischer Beweis das Aufgebot der höchsten Kräfte der mathematischen Analysis erforderte, er (Faraday) durch eine Art innerer Anschauung mit instinktiver Sicherheit gefunden hat, ohne eine einzige mathematische Formel aufzustellen".

In der Tat war Faraday die Förderung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse durch den Hebel der mathematischen Analysis schon durch die Art seines Bildungsganges ver-

schlossen; scherzhaft soll er sich bei einer Gelegenheit gerühmt haben, „daß er einmal im Laufe seines Lebens eine mathematische Operation ausgeführt habe, nämlich als er den Griff von Babbages Rechenmaschine gedreht habe". Er beklagte wohl gelegentlich sein unvollkommenes mathematisches Wissen, bewunderte auch die mathematischen Kenntnisse anderer, hatte aber doch die Überzeugung, daß bei der Erforschung chemischer und physikalischer Wirkungen das Experiment mit der mathematischen Behandlung in erfolgreichen Wettbewerb treten könne, und daß die Mathematiker jedenfalls imstande sein sollten, ihre Endformeln in die Sprache des gewöhnlichen Lebens zu übersetzen und dadurch auch für Nichtmathematiker benutzbar zu machen. Er übersah, daß der Ausbau und die folgerichtige allseitige Durcharbeitung von physikalischen Theorien in der zu einem gegenständlichen Dasein und zur Überlieferung an nachgeborene Geschlechter bestimmten Wissenschaft nicht von der Einbildungskraft abhängig gemacht werden darf, die bei verschiedenen Individuen in sehr verschiedener Stärke und nach ganz verschiedenen Richtungen hin entwickelt zu sein pflegt. Die mathematische Symbolik hat eben den großen Vorzug, daß sie eine von jeder individuellen Färbung freie Formulierung der durch Beobachtung und Versuch oder anderweitig hinreichend festgestellten Grundwahrheiten ermöglicht und die Ableitung der daraus fließenden Folgerungen jeder Unsicherheit und jedem subjektiven Einwurfe entrückt. Stellen sich Widersprüche mit der Erfahrung heraus, so ist immer auf einen Fehler in den ersten Annahmen zu schließen, mögen diese nun an sich unrichtig oder nur unvollständig sein oder Überflüssiges enthalten. Bei einer Theorie dagegen, die nur auf innere Anschauungsbilder gestützt ist, werden die der Verbesserung bedürftigen Punkte gar nicht oder doch nur sehr schwierig zu entdecken

sein. Daß Faradays elektrische Theorie, die zu seinen Lebzeiten kaum verstanden und gewürdigt, vielmehr oft als überflüssige und wunderliche Beigabe zu den von ihm festgestellten Tatsachen und Gesetzen betrachtet wurde, schließlich doch zu allgemeiner Anerkennung und unbestrittener Herrschaft gelangte, verdankte sie in erster Linie kaum ihrer Anschaulichkeit, sondern ihrer mathematischen Fassung und Ausgestaltung durch Maxwell. Maxwell zeigte, daß die bisherigen mathematischen Theorien und die in mathematische Form gekleideten Ideen Faradays im allgemeinen zu gleichen Ergebnissen führen, von denselben Erscheinungen Rechenschaft geben und die gleichen Wirkungsgesetze liefern, und der Unterschied nur darin besteht, daß jene synthetisch aufbauend das Ganze aus seinen Teilen entstehen lassen, während die Faradaysche Methode analytisch vom Ganzen aus die einzelnen Teile gewinnt. Erst nach dem Nachweis dieser Gleichwertigkeit des Alten und Neuen in formaler Beziehung konnte der Faradaysche Gedankenkreis seine inneren Vorzüge voll entfalten, und der Sieg mußte ihm werden, als man seine Verwandtschaft und innige Berührung mit den auf den übrigen Gebieten der Physik sich herausbildenden Überzeugungen erkannte.

Daß Faraday von der Lebhaftigkeit seines Geistes und von seiner außerordentlich regen Phantasie, die ihn nach eigenem Geständnis „ebenso leicht an Tausendundeine Nacht wie an die Enzyklopädien" glauben ließ, nicht zu zügellosen Spekulationen fortgerissen wurde, die Ergebnisse, zu denen er gelangte, sich vielmehr stets als mathematisch faßbar erwiesen, verdankte er seiner Achtung vor Tatsachen. „Einer Tatsache", sagt er, „konnte ich Zutrauen schenken, und ihre Bestätigung prüfte ich nach allen Richtungen." Das Experiment war ihm bei allen Entscheidungen

in seiner Wissenschaft höchste und letzte Instanz. „Ich habe weit mehr Vertrauen," schreibt er, „zu einem Mann, der geistig und körperlich an einer Sache arbeitet, als zu sechsen, die darüber reden. Nichts ist so gut als ein Experiment, welches, während es Irrtümer beseitigt, einen unbedingten Fortschritt der Wissenschaft herbeiführt." Es war ihm unmöglich, sich nach bloßer Beschreibung Tatsachen so zu eigen zu machen, daß er ein Urteil über ihre Bedeutung abzugeben vermochte; er mußte sie erst sehen. Aus diesem Grunde verzichtete er auch darauf, Studenten oder Schüler zu seinen Arbeiten heranzuziehen, ja sogar auf die Annahme eines wissenschaftlichen Assistenten. Er schätzte den Versuch nicht nur als das wichtigste Werkzeug in der Hand des Forschers, sondern auch als treffliches Mittel bei der Erziehung zur Beseitigung des Mangels an Urteilskraft und empfahl deshalb die Aufnahme naturwissenschaftlicher Fächer in die Lehrpläne der Schulen aufs wärmste.

Er selbst war ein ganz hervorragender Experimentator. Mit welcher Vorsicht und Umsicht er seine Fragen an die Natur zu stellen verstand, mit welchem technischen Geschick er jede entgegenstehende Schwierigkeit zu überwinden wußte, davon geben die 29 Reihen seiner von 1831 bis 1851 veröffentlichten Experimentaluntersuchungen (**Experimental Researches**) ein schönes und lehrreiches Zeugnis. Ein besonders gern und sehr erfolgreich verwendetes methodisches Hilfsmittel von ihm ist die Anstellung von Versuchsreihen, die quantitativ abgestufte Erscheinungen umspannen und zueinander in innere Beziehung setzen. „Diese Verfolgung der Vorgänge durch Experimente und Überlegung", sagt er, „von den Resultaten der kräftigsten Apparate an bis zu denen sehr schwacher ist von großem Vorteil für die Ermittelung der wahren Ursachen einer Erscheinung" (**E. R.** 1069). Die Vergleichung extremer Vorgänge befähigt uns,

„das Wesen einer Wirkung im Zustande der Schwäche zu begreifen, die uns vielleicht nur bei größerer Stärke hinlänglich klar ist“ (E. R. 1169). So verbindet er z. B. bei den Untersuchungen, die zur Entdeckung der Extraströme führten, die Pole der galvanischen Batterie der Reihe nach durch einen Draht, der zur Erregung eines Elektomagneten dient, durch verschiedene Solenoide ohne Eisenkern, durch einen langen ausgestreckten Draht und endlich durch einen kurzen Draht und findet, daß im ersten Falle die Funken und physiologischen Wirkungen beim Öffnen und Schließen der Kette am besten erhalten werden, daß ein Solenoid einem geraden Draht überlegen ist und bei einem kurzen Draht alle Wirkungen verschwinden. Es ist also eine Abstufung der Wirkungen, mithin auch des ihnen zugrunde liegenden Vorganges von einem Maximum bis auf Null möglich. Der kürzeste Draht zeigt offenbar nur die von der Batterie selbst erzeugte Kraft an, die in den übrigen Vorrichtungen hervortretenden Kräfte entspringen dagegen aus einer dauernden oder vorübergehenden Abänderung des Stroms in dem Draht selbst. Daß dabei nicht die Länge des Drahtes von maßgebender Bedeutung ist, wird durch die Überlegenheit eines spiralig aufgewickelten Drahtes über einen gleich langen und auch sonst gleichen Draht bewiesen. Die hierdurch geweckte Vermutung, daß es sich um Induktionswirkungen handle, bestätigt sich schließlich durch die Richtung des vom permanenten Strom auf geeignete Weise gesonderten Extrastroms. Das gleiche methodische Prinzip veranlaßt ihn, „die höchsten Fälle von Leitung als analog oder selbst als gleichartig mit dem der Verteilung und Isolation aufzufassen“ (E. R. 1327). Das schwache Eindringen von Elektrizität in Dielektrika ist ein Anzeichen ihres Leitungsvermögens, der Widerstand metallischer Leiter ein Beweis ihres Isolationsvermögens, nur

die für die Leitung in den verschiedenen Fällen erforderliche Zeit ist verschieden. Die Erkenntnis der nahen Verwandtschaft der verschiedensten Formen elektrischer Entladung und die schöne Theorie der Dielektrika, ja selbst die Entdeckung des Diamagnetismus knüpfen sich an diese Anschauungen.

Anfänglicher Mißerfolg bei Versuchen, von denen Faraday auf wohlbegründete Überzeugung hin ein positives Ergebnis erwarten durfte, entmutigten ihn nie; er verfeinerte seine Methoden, verstärkte die wirkenden Kräfte, suchte neue Wege und gelangte schließlich fast stets zum Ziel. Dann blitzte sein Auge vor Freude, und er konnte ausgelassen lustig wie ein Knabe sein. Als es ihm am 3. September 1821 geglückt war, einen stromdurchflossenen Draht zur Rotation um einen Magnetpol zu bringen, rieb er sich vor Vergnügen die Hände, tanzte um den Tisch und rief mit strahlendem Gesicht aus: „Da geht sie! da geht sie! endlich ist es uns gelungen!“ Am Weihnachtstage desselben Jahres erhielt er die Drehung des Stromleiters unter dem Einflusse des Erdmagnetismus; nie konnte sein dabei anwesender Schwager George Barnard den Enthusiasmus vergessen, der sich in Faradays funkelnden Augen aussprach und wie er rief: „Siehst du, siehst du, siehst du, George?“ Selbst bei Wiederholung entscheidender Experimente erfüllte ihn eine ähnliche Aufregung; als er bei einer Vorführung der Wirkung des Magnetismus auf das Licht zum Schlußexperiment gelangt war, sprühten, wie Dumas berichtet, seine Augen Flammen, und sein belebtes Antlitz bezeugte die leidenschaftlichen Gefühle, die er den Entdeckungen der Wissenschaft entgegenbrachte. Es änderte nichts an seinen Empfindungen, wenn diese Entdeckungen von anderen herrührten. Als ihm Plücker die Einwirkung des Magneten auf die Kathodenstrahlen zeigte, tanzte Faraday um die Geißlerschen Röhren

herum und rief beim Anblick der sich bewegenden Lichtbogen: „O könnte man immer darin leben!“ Bei einer Zusammenkunft des Amerikaners Henry mit Faraday, Wheatstone und Daniell bemühten sich die drei letzten vergeblich, durch eine Thermosäule einen Funken zu erzeugen; als es Henry gelang, wurde Faraday wild wie ein Knabe und ließ ein „Hoch das Yankee-Experiment!“ erklingen.

Die physikalischen Forschungen Faradays werden von zwei Leitmotiven beherrscht, die immer wieder anklingen, bald jedes für sich, bald in wechselseitiger Verschmelzung. Das eine ist die Idee von der Einheit aller Naturkräfte, das andere die Überzeugung, daß alle Kraftwirkungen sich von einem materiellen Teilchen auf die nächst benachbarten fortpflanzen, eigentliche Fernwirkungen also in der Natur ausgeschlossen sind.

Jene Idee erhält bei Faraday eine eigenartige, fast mystische Färbung, die vielleicht als Ausfluß seines tiefen und warmen religiösen Empfindens zu betrachten ist, durch den Glauben, daß alle Naturkräfte als verschiedene Betätigungen einer einzigen „großen Kraft“ aufzufassen seien, daß ein und dieselbe Kraft unter besonderen Bedingungen auch in besonderer Weise in die Erscheinung trete (E. R. 2221). „Seit lange“, sagt er, „habe ich vermutlich mit vielen anderen Freunden der Naturkunde, die an Überzeugung streifende Meinung gehegt, daß die verschiedenen Formen, unter denen die Kräfte der Materie auftreten, einen gemeinschaftlichen Ursprung haben, oder, mit anderen Worten, so in direktem Zusammenhange und gegenseitiger Abhängigkeit stehen, daß sie gleichsam ineinander verwandelt werden können und äquivalente Kräfte in ihren Wirkungen besitzen“ (2146). Auf weitere metaphysische Spekulationen über das Wesen jener Urkraft läßt sich indessen der nüchterne Wirklichkeitssinn eines

Faraday nicht ein. Vielmehr ist sein ganzes Streben darauf gerichtet, die beobachteten Umsetzungen von Kräften durch Maß und Zahl zu erfassen und auszudrücken. Eine elektrische Stromkraft z. B. kann nie erzeugt werden, „ohne tätige Ausübung und Verzehrung eines gleichen Betrages von chemischer Kraft“, der Betrag jener ist„ ein genaues Äquivalent“ von dieser (E. R. 1803). „In Zukunft mögen wir imstande sein, Korpuskularkräfte wie die der Schwere, Kohäsion, Elektrizität und chemischen Verwandtschaft miteinander zu vergleichen und auf diese oder jene Weise ihre relativen Äquivalente aus ihren Effekten abzuleiten“ (E. R. 1686). Die Annahme einer Schöpfung von Kraft, wie sie z. B. nach Faradays Auffassung der Voltaschen Kontakttheorie zugrunde liegt, findet in keiner bekannten Tatsache irgendwelchen Halt, sie liegt selbst nicht bei den elektrischen Schlägen des Zitterrochens und Zitteraals vor. Jeder Erzeugung von Kraft entspricht eine Erschöpfung von etwas ihr Nahrung Gebendem (E. R. 2071). Sonst „würde auch das perpetuum mobile möglich sein, und es würde gar nicht schwer halten, eine elektromagnetische Vorrichtung zu konstruieren, die, dem Prinzipe nach, unaufhörlich mechanische Effekte hervorbrächte“ (E. R. 2073).

Diese Ansichten lagen zu Faradays Zeiten gewissermaßen in der Luft; sie finden sich nicht nur bei manchen anderen Physikern jener Tage, sondern werden vereinzelt auch schon vorher, wenigstens für rein mechanische Vorgänge, deutlich ausgesprochen. Er hat aber zu den bereits bekannten Kraftverwandlungen die Umsetzung magnetischer Kräfte in elektrische und die von beiden in Lichtwirkungen, sowie die Feststellung der Äquivalenz elektrischer und chemischer Kräfte gefügt und damit den Sturz der Lehre von den Imponderabilien auch in der Elektrizitätslehre besiegelt, wo sie sich, neben der Wärmelehre, am längsten einer wohl-

wollenden Duldung erfreute. Die Befugnisse der verschiedenen Fluida wurden fortan auf den Äther übertragen, von dem Faraday selbst allerdings nur mit großer Zurückhaltung spricht. — Faraday durchaus eigentümlich ist die felsenfeste Überzeugung von der vermittelnden Rolle des Zwischenmediums bei allen Übertragungen magnetischer und elektrischer Wirkungen von einem Körper auf einen entfernten zweiten, ja bei allen angeblichen Fernwirkungen überhaupt. Sie beherrscht seine wichtigsten experimentellen Untersuchungen und hat durch sie glänzende Bestätigungen erhalten. Sie erringt sich in der Vision der magnetischen und elektrischen Kraftlinien ein plastisches Bild für die der unmittelbaren sinnlichen Wahrnehmung entzogenen Vorgänge, sie führt zur Entdeckung der Dielektrizitätskonstanten, der magnetischen Drehung der Polarisationsebene des Lichtes und des Diamagnetismus. Abstrakte metaphysische Erwägungen lagen dabei Faraday fern. Er forderte keineswegs eine kontinuierliche Erfüllung des Raumes als notwendige Bedingung für die Übertragbarkeit irgendwelcher Kraftwirkungen in die Ferne, sondern hielt nur entschieden an der Beteiligung des Zwischenmediums bei Kraftübertragungen fest, sofern ein solches vorhanden ist. „Gesetzt," sagt er in einer Auseinandersetzung über Induktionswirkungen, „es sei einem positiv elektrisierten Teilchen möglich, im Mittelpunkt eines Vakuums von einem Zoll (1 inch = 2,539 cm) Durchmesser zu existieren, so hindert nichts in meiner Theorie das Teilchen in der Entfernung von einem halben Zoll auf alle die Grenzfläche der Kugel bildenden Teilchen zu wirken. . . . Wäre aber die zollgroße Kugel mit isolierender Substanz gefüllt, dann würde das elektrische Teilchen, nach meiner Ansicht, nicht unmittelbar auf die entfernten Teilchen wirken, sondern auf die nächstanliegenden und seine ganze Kraft zu deren Polarisierung

verwenden, erzeugend in ihnen auf der zugewandten Seite eine negative und auf der abgewandten eine positive Kraft, beide von gleichem Betrage mit seiner eigenen positiven Kraft, von denen jene abgewandte Kraft in gleicher Weise auf die nächstfolgenden Lagen von Teilchen wirkte, so daß zuletzt diejenigen Teilchen auf der Oberfläche der Kugel von einem Zoll im Durchmesser, auf welche, wenn die Kugel ein Vakuum wäre, direkt eingewirkt würde, von dem Teilchen in der Mitte oder der Quelle der Wirkung eine indirekte Einwirkung erfahren, d. h. in derselben Weise und mit gleichem Kraftbetrage polarisiert werden" (E. R. 1615).

Wir wollen uns hier nur mit den Arbeiten Faradays näher beschäftigen, die dem Gebiete der Elektrizitätslehre angehören. Seine erste epochemachende Entdeckung auf diesem Felde war die bereits erwähnte der Drehung eines beweglichen stromdurchflossenen Leiters um einen festen Magnetpol und eines beweglichen Magnetpols um einen festen Leiter im Jahre 1821. Er machte sie bei Wiederholung der bis dahin bekannten elektromagnetischen Versuche Oerstedts, Ampères, Aragos und anderer. Ihre theoretische Bedeutung war eine sehr große. Zwar hatte schon Oerstedt selbst den von ihm beobachteten „elektrischen Konflikt", d. h. die Ablenkung der Magnetnadel durch den Strom als Erzeugung einer schwingenden oder drehenden Bewegung charakterisiert. Aber die im Banne der Newtonschen Mechanik stehenden Physiker vermochten sich zunächst nur anziehende und abstoßende Kräfte in der geraden Verbindungslinie aufeinander wirkender Massenpunkte vorzustellen; eine Wirkung senkrecht zu dieser Verbindungslinie erschien als paradox und man versuchte deshalb durch verschiedene Annahmen den Vorgang auf das Newtonsche Schema zurückzuführen. Faradays Experiment entzog derartigen Künsteleien den Boden. Er selbst hebt in einem acht Tage später an

de la Rive geschriebenen Briefe hervor, daß es sich hier weder um „Anziehungen noch Abstoßungen, noch die Folge von anziehenden und abstoßenden Kräften" handle, sondern die Kräfte in dem Drahte bestrebt sind, den Pol „in eine kreisförmige Bewegung um den Draht zu versetzen, so lange die Batterie tätig bleibt" und zwar nach einem einfachen, völlig bestimmten Gesetze.

Zugleich wurde ihm bei der Nachprüfung der Ampèreschen Theorie die unzureichende experimentelle Begründung fühlbar, die ihr von ihrem Urheber gegeben worden war, und er beschloß demgegenüber im Zweifel zu beharren, „bis die Anwesenheit von elektrischen Strömen im Magnet durch andere als magnetische Wirkungen bewiesen" sei (Brief an de la Rive). Erst seine zweite glänzende Entdeckung, die der Induktionsströme und der magneto-elektrischen Induktion insbesondere, beseitigte diese Bedenken. Die Erfindung des Elektromagneten, also die Erzeugung von Magnetismus durch Elektrizität erweckte in Faraday, dem die Umkehrbarkeit aller physikalischen Vorgänge grundsätzlich feststand, sofort die Überzeugung von der Möglichkeit, Magnetismus in Elektrizität umzusetzen. Aber seine wiederholten Bemühungen in dieser Richtung blieben zunächst erfolglos, und zwar deshalb, weil er nur mit ruhenden Magneten und Stromleitern bzw. stationären Strömen arbeitete. Und doch hatten die Versuche Aragos über Rotationsmagnetismus und die anschließenden von Babbage, Herschel und Sturgeon schon Hindeutungen auf den zum Ziele führenden Weg gegeben. Aber weder sie selbst noch Faraday erkannten zunächst die Bedeutung des Momentes der Bewegung. Erst 1831 gelangte Faraday zu dem lange gesuchten Ergebnis. Er bewickelte einen Ring aus weichem Eisen an zwei Stellen mit isoliertem Kupferdraht, leitete durch das eine der beiden Gewinde einen Batteriestrom und erhielt beim

Schließen und Öffnen des Stromes Wirkungen auf eine Magnetnadel, über die der Schließungsdraht des zweiten Gewindes hinwegführte (E. R. 27). Hier hatte der Magnetismus des von der ersten Spule gebildeten Elektromagneten den Eisenkern der zweiten Spule magnetisiert und dadurch in der zweiten Spule einen Strom erzeugt. Faraday erhielt nun auch das entsprechende Ergebnis durch Stahlmagnete. Die Enden eines Solenoids (Helix), in dem ein Kern aus weichem Eisen steckte, verband er mit einem entfernten Galvanometer. Den Eisenkern legte er zwischen die entgegengesetzten Pole von zwei Stabmagneten, deren beide anderen Pole sich berührten. Der Stromanzeiger bewegte sich bei jeder Unterbrechung und Schließung des magnetischen Kontaktes des einen der beiden Pole mit dem Eisenkern (E.R.36). Der Nachweis der reinen Elektroinduktion folgte bald, und nach nur zehn Tagen angestrengten Experimentierens hatte Faraday die Grunderscheinungen der elektrischen und der magneto-elektrischen Induktion vollkommen festgestellt und auch schon gefunden, daß bei Aragos Rotationsmagnetismus Induktionsströme als wirkende Ursache anzusehen sind. Die geordnete Darstellung dieser Arbeit und einiger sich unmittelbar anschließenden bildet den Inhalt der ersten und zweiten Reihe von Faradays Experimentaluntersuchungen über Elektrizität, während der Nachweis der Selbstinduktion und der Extraströme erst in der neunten Reihe von 1834 erfolgte. In Nr. 1 dieser durch fortlaufende Numerierung in kurze Abschnitte zerlegten Berichte überträgt Faraday den Namen „Induktion“ aus der Lehre von der gewöhnlichen Spannungselektrizität auf die neuen Erscheinungen und gibt damit schon hier seiner Meinung von dem Bestehen einer inneren Verwandtschaft zwischen den beiden, anscheinend höchst verschiedenartigen Reihen von Vorgängen Ausdruck. Wenn die induzierten Stromstöße

auch nur im Augenblicke des Entstehens oder Verschwindens benachbarter Ströme oder magnetischer Kräfte bzw. bei Annäherung oder Entfernung von Strömen oder Magneten auftraten, so war doch Faraday überzeugt, daß die sekundären Stromleiter sich auch in der Zwischenzeit unter dem Einflusse naher Ströme oder Magneten in einem besonderen Zustande befinden müßten, den er auf den Rat „gelehrter Freunde“ als den elektrotonischen bezeichnete. Die Erforschung dieses elektrotonischen Zustandes zieht sich wie ein roter Faden durch alle weiteren Untersuchungen von Faraday. Vorläufig bemühte er sich allerdings vergeblich, irgendwelche sinnlich wahrnehmbaren Anzeichen desselben zu finden. Aber das hinderte ihn nicht, die Vorstellung mit seiner lebhaften Einbildungskraft weiter auszuspinnen und dadurch schon jetzt ein Programm für spätere wissenschaftliche Arbeiten zu entwerfen. Er sah im Geiste die Teilchen des induzierten Leiters und wohl auch seiner Umgebung durch die induzierenden Kräfte in einen Spannungszustand geraten, der sich nur teilweise durch die Induktionsströme entlädt (E. R. 71); diese Entladung mochte eine durch das gute Leitvermögen metallischer Leiter begünstigte sekundäre Erscheinung, jene Spannung aber auch „in Flüssigkeiten und selbst in Nichtleitern vorhanden sein“ (E. R. 73); „der elektrische Strom, welcher einen benachbarten Draht in den elektrotonischen Zustand versetzt, erregt diesen wahrscheinlich auch in seinem eignen Draht“ (E. R. 74) und aus diesem Gesichtspunkte läßt sich eine neue anschauliche Ansicht von den Zersetzungen in der Voltaschen Kette und der Überführung der chemischen Elemente zu den Polen gewinnen (E. R. 76).

Als eine genauere Ausmalung des elektrotonischen Zustandes der Materie erscheint Faradays Kraftlinientheorie, obgleich er sie vorübergehend vielmehr als Ersatz jener An-

schauung betrachtet wissen wollte (E. R. 242). Schon in der ersten Reihe der Experimentaluntersuchungen spielen die magnetischen Kraftlinien bei der Beschreibung der Beziehung zwischen Magnetpol, bewegtem Metall und der Richtung des induzierten Stromes eine wichtige Rolle. Faraday versteht hier unter ihnen oder den magnetischen Kurven „die bekannten Linien, in welchen sich Eisenfeilicht über Magnetstäben ordnet, oder diejenigen, welche die Richtungen einer sehr kleinen Magnetnadel als Tangenten haben würden“ (E. R. 114 Anm.). Für die Richtung der Induktionsströme erhält er dann folgende Angabe. Man lege quer über einen zylindrischen Magnetstab, dessen Nordpol mit A, dessen Südpol mit B bezeichnet ist, mit aufwärts gekehrter Schneide eine Messerklinge, an deren Heft der Buchstabe P, an deren Spitze N steht, und deren zum Einsetzen des Nagels bestimmte Kerbe für einen von oben auf die Schneide blickenden Beobachter links liegt. Läßt man stets die von A ausgehenden Kraftlinien auf die gekerbte Seite der Messerklinge treffen und schneidet mit der Klinge die Kraftlinien so, daß die Schneide vorangeht, so entsteht ein Strom von P nach N; geht aber der Rücken voran, so fließt der Strom von N nach P. „Es läßt sich leicht ein kleines Modell verfertigen, worin der Magnet durch einen kleinen Holzzylinder ersetzt ist, die Klinge durch ein Kartenblatt und eine der magnetischen Kurven durch einen Draht, welcher das eine Zylinderende mit dem anderen verbindet und durch ein Loch im Kartenblatt geht“ (E. R. 116). Leider entspricht die Lage der Kerbe bei den Messerklingen nicht immer der bei Faradays Messer. Man wird nötigenfalls die Kerbe dem Südpol zuzukehren haben, um die Stromrichtungen beim Schneiden der Kraftlinien richtig zu erhalten. Weiß man einmal darüber Bescheid, so ist Faradays Vorschrift sehr anschaulich und bequemer als die Flemingsche

Dreifingerregel für die rechte Hand, die oft zu höchst ungemütlichen Verdrehungen zwingt.

Ob sich Faraday die Kraftlinien am Magneten haftend vorstellte oder nicht, ist mit Sicherheit nicht zu entscheiden; wahrscheinlich haben seine Ansichten darüber geschwankt. In der ersten Abhandlung über die Volta- und die magnetoelektrische Induktion ist er jedenfalls der Meinung, daß das Kraftfeld (den Ausdruck „magnetisches Feld“ gebraucht Faraday zum ersten Male in E. R. 2252) zylindrischer Magnete bei ihrer Rotation um die Achse von ihnen nicht festgehalten wird. Denn um zu ermitteln, „ob es wesentlich sei oder nicht, daß der sich bewegende Teil des Drahtes, bei Durchschneidung der magnetischen Kurven, in Stellungen von größerer oder geringerer magnetischer Kraft übergehe, oder ob, bei steter Durchschneidung von Kurven gleicher magnetischer Intensität, die bloße Bewegung zur Erzeugung des Stromes hinreichend sei“ (E. R. 217), kittete er eine Kupferscheibe auf dem mit Papier überzogenen Ende eines zylindrischen Magnetes fest und setzte beide zusammen in Rotation (E. R. 218). Bei diesem Versuch kann von einem Schneiden der magnetischen Kraftlinien durch die Kupferscheibe offenbar nur die Rede sein, wenn das Feld mit dem Magneten nicht verbunden ist. Die Ergebnisse waren aber solche, als ob von der Kupferscheibe Kraftlinien geschnitten würden; ja, bei Wegnahme der Kupferscheibe ließen sich sogar im Metall des Magneten selbst Ströme von der nach der allgemeinen Regel zu erwartenden Richtung nachweisen, so daß „sich eine sonderbare Unabhängigkeit zwischen dem Magnetismus und dem Stab, worin er befindlich ist“, ergab (E. R. 220). Zwanzig Jahre später bekräftigt er diesen Standpunkt mit den Worten: „Das den Magnet umgebende Kräftesystem braucht man sich nicht notwendig mit dem Magnet rotierend zu denken, so wenig wie man annimmt,

daß die Lichtstrahlen, welche von der Sonne ausgehen, mit dieser rotieren" (E. R. 3090), erklärt aber doch im gleichen Jahre, er habe allen Grund zu glauben, daß die Kraftlinien „in der Erde, der sie ihre Entstehung verdanken und aus der sie sich erheben, festgehalten werden, gerade so wie die einem Magneten entspringenden Linien von ihm, wenn auch nicht in demselben Maße, festgehalten werden" (Proc. of the roy. Inst. 11. April 1851)

Selbstverständlich sind die durch Eisenfeilspäne sichtbar gemachten Kurven nur als unvollkommene Bilder, gewissermaßen als mit einem weitmaschigen Raster aufgenommene Phototypien des wirklichen Kraftfeldes anzusehen. Eine zutreffendere Veranschaulichung des Zustandes eines magnetischen Kraftfeldes, wie ihn Faraday sich vorstellt, gibt ein in seiner Längsrichtung gezerrtes Gummiband, in dem längs dieser Richtung auf Verkürzung hinzielende, also anziehende, quer dazu abstoßende Kräfte entstehen. In dieser Entwicklung der Idee eines Spannungszustandes im Felde erblickte Faraday den angemessensten Ausdruck für die natürliche Wahrheit; die Übertragung magnetischer Kräfte kommt danach durch außerhalb des Magneten liegende Wirkungen zustande, von Anziehungen oder Abstoßungen aus der Ferne ist nicht die Rede.

Seine Kraftlinientheorie befähigte ihn aber nicht nur zu genauester qualitativer Beschreibung, sondern auch zum messenden Erfassen der Erscheinungen durch den glücklichen Gedanken, daß die in irgendeiner Abteilung („Kraftröhre" nach Stokes) der Kurven enthaltene Kraftsumme für jeden Querschnitt dieser Abteilung eine unveränderliche Größe ist, mögen sich die Linien in ihrem Verlaufe zusammenziehen oder auseinandergehen (Einleitung zur 28. Reihe der E. R.). Die Feldstärke an irgendeiner Stelle wird also durch die Dichte der Kraftlinien daselbst versinnlicht. In-

dessen tritt diese Anschauung erst in späteren Abhandlungen Faradays auf. Mit voller Deutlichkeit aber entwickelt er bereits in der zweiten Reihe der Experimentaluntersuchungen, die sich hauptsächlich mit der magneto-elektrischen Induktion durch den Erdmagnetismus beschäftigt, die Vorstellung, daß ebenso wie jede magneto-elektrische, so auch jede Volta-elektrische Induktion durch das Schneiden von Kraftlinien hervorgerufen wird. Ein von einem elektrischen Strom durchflossener Draht ist „an jeder Stelle von magnetischen Kurven umgeben, die mit ihrem Abstande von dem Drahte schwächer werden, und sich mit Ringen vergleichen lassen, die in senkrechten Ebenen gegen den Draht oder vielmehr gegen den in demselben vorhandenen Strom gelegen sind" (E. R. 232). Ein zweiter Draht, der irgendwie in paralleler Lage zu dem ersten bewegt wird, muß also stets Kraftlinien schneiden, und durch die Messerregel läßt sich die Richtung der dadurch induzierten Ströme leicht angeben, wenn man sich die geschnittenen Stücke der Kraftlinien durch einen Hufeisenmagneten erzeugt denkt. Induziert man den Strom in einem ruhenden zweiten Drahte durch Schließen oder Öffnen eines primären Stroms, so hat man im ersten Falle anzunehmen, „die magnetischen Kurven bewegten sich (wenn dieser Ausdruck erlaubt ist) senkrecht gegen den zweiten Draht, vom Moment der Entwicklung des Stromes bis zu dem seiner größten Stärke", im zweiten „die magnetischen Kurven (was ein bloßer Ausdruck für Anordnung magnetischer Kräfte ist) zögen sich zusammen und kehrten zu dem verschwindenden elektrischen Strom zurück" (E. R. 238)

Nach Entdeckung der wahren Ursache des Rotationsmagnetismus machte Faraday einige „rohe Versuche in der Absicht, Magneto-Elektrisiermaschinen zu verfertigen" (E. R. 135). Er ließ z. B. einen Ring aus dickem Kupferblech zwischen den Polen eines Magneten rotieren und ent-

nahm ihm einen Strom durch auf den Rändern dicht bei den Magnetpolen schleifende Konduktoren. Aus einer um eine vertikale Messingachse sich drehenden Kupferscheibe, von der die magnetischen Kurven der Erde bzw. die Richtung der Inklinationsnadel unter einem Winkel von beiläufig 70° geschnitten wurden, gewann er ebenfalls, allerdings nur schwache Ströme, die er weiterhin durch gewisse Konstruktionsänderungen verstärkte. Freilich blieb die Kraft immer noch zu gering, um eine technische Verwertung zu ermöglichen. Faraday ist zwar überzeugt, daß man in Zukunft Mittel zur Beseitigung dieses Mangels finden werde, verzichtet aber für seine Person auf entsprechende Versuche. „Ich habe", sagt er, „mehr dahin getrachtet, neue Tatsachen und neue Beziehungen der magneto-elektrischen Induktion zu entdecken, als die Stärke der schon ermittelten zu erhöhen, in der Überzeugung, daß das letztere seine volle Entwicklung späterhin finden werde" (E. R. 159). Die Erfindung der Dynamomaschine mit ihren vielfachen Verwendungen hat ihm hierin vollauf Recht gegeben.

Der erfolgreiche Gebrauch der Begriffe des Feldes und der Kraftlinien bei den Untersuchungen über die Erscheinungen der elektrodynamischen Induktion mußte die Hoffnung erwecken, auf ähnlichem Wege auch klarere Vorstellungen über den Vorgang bei der zunächst nur namensvetterlich verwandten elektrostatischen Induktion zu gewinnen. Das wesentliche der neuen Theorie war die Annahme eines eigentümlichen Spannungszustandes in dem die Wirkungen vermittelnden Medium, einer Richtung seiner Teilchen ähnlich der Einstellung einer frei beweglichen Magnetnadel, mithin einer gewissen Zweiseitigkeit, einer Polarität dieser Teilchen. Der experimentelle Nachweis solch molekularer Polarisationszustände stand freilich noch aus. Jedoch hatten die chemischen Wirkungen des Stromes

in Zersetzungsapparaten schon 1805 Grothuß zu einer Erklärung geführt, nach der sich unter den Einflüssen eines durch Wasser gehenden Stromes die Moleküle des Wassers zunächst so drehen, daß sie die Sauerstoffatome dem positiven, die Wasserstoffatome dem negativen Pole zukehren, und dieser Erklärung traten Davy und die Mehrzahl der Physiker bei. Für Faraday lag es also nahe, hier weitere Untersuchungen anzustellen, die Richtigkeit der Anschauungen von Grothuß und Davy durch Versuche zu prüfen und sie womöglich seiner eigenen umfassenderen Idee dienstbar zu machen. Von Wichtigkeit war dabei der Nachweis, daß zwischen der Stromleitung in zersetzbaren Flüssigkeiten und dem Ausgleich elektrischer Spannungsunterschiede ohne chemische Zersetzungen kein wesentlicher Unterschied bestehe, vielmehr jene in diesen übergehen kann: denn dann war, die Richtigkeit der Anschauung von Grothuß vorausgesetzt, die größte Wahrscheinlichkeit dafür vorhanden, daß auch im zweiten Falle die Teilchen des Leiters sich in bestimmter Weise ordnen, ja, daß eine solche Anordnung schon dann in dem zwischen zwei Körpern liegenden Mittel auftrete, wenn jene Körper nur überhaupt eine elektrische Potentialdifferenz besitzen, mag diese nun zum Ausgleich kommen oder nicht.

Bevor Faraday die hier skizzierten Aufgaben in Angriff nahm, zog er zunächst als geschickter Feldherr seine Truppen zusammen und überzeugte sich bei einer Revue von der besonderen Fähigkeit jedes einzelnen Korps. Er überblickte alle bekannten Elektrizitätsarten, die Voltasche, die Reibungs-, die Magneto-, die Thermo- und die tierische Elektrizität und stellte durch Versuche fest, daß „die Elektrizität, aus welcher Quelle sie auch entsprungen sei, identisch ist in ihrer Natur“ (E. R. 360). Die Erscheinungen der fünf angeführten Arten „sind nicht in ihrem Wesen, sondern nur

dem Grade nach verschieden". Sie lassen sich auf Quantitäts- und Intensitäts-Unterschiede zurückführen; denn die Verschiedenheiten in den Äußerungen der verschiedenen Elektrizitätsarten treten auch bei Benutzung ein- und derselben Elektrizitätsquelle auf, wenn man nur jene beiden Bestimmungsgrößen entsprechend variiert.

Die von Faraday in Betracht gezogenen Wirkungen, nämlich physiologische, Ablenkung der Magnetnadel, Magnetisierung von Eisen, Funkenentladung, Wärmeerregung, chemische Zersetzung, Anziehung und Abstoßung und Entladung durch heiße Luft ließen sich sämtlich für die Reibungs- und für die Voltaelektrizität nachweisen. Diese in der dritten Reihe seiner Experimentaluntersuchungen vom Jahre 1832 ausführlich wiedergegebenen Untersuchungen ermöglichten Faraday eine weitgehende Verwendung seiner Methode der quantitativen Abstufung. Er konnte überzeugt sein, immer dieselbe elektrische Kraft wirken zu lassen, mochte er nun die geringen, aber hochgespannten Elektrizitätsmengen einer großen Elektrisiermaschine oder die großen, aber schwachgespannten eines galvanischen Elementes bei seinen Versuchen benutzen. Er versäumte nicht, den Unterschied durch Aufstellung einer Maßbeziehung möglichst klar zu legen. Unter Einschaltung einer feuchten Schnur entlud er eine durch 30 Umdrehungen der Scheibe einer kräftigen Elektrisiermaschine geladene Batterie von sieben Leydener Flaschen durch ein Galvanometer; bei derselben Umdrehungszahl, also Erzeugung der gleichen Elektrizitätsmenge, aber Benutzung von 15 gleichgroßen Flaschen, mithin Herabsetzung ihrer Spannung etwa auf die Hälfte, erhielt er am Galvanometer den gleichen Ausschlag. Bewirkte er aber die Ladung der 15 Flaschen durch 50 Umdrehungen, so wurde die Ablenkung größer. Er schloß, „daß, wenn die Elektrizität in gleicher absoluter Menge durch das Galvano-

meter geleitet wird, wie groß auch ihre Intensität sein mag, die ablenkende Kraft auf die Magnetnadel gleich ist" (E. R. 366). Und da die Ablenkung durch die Entladung der Batterie von 15 Flaschen bei 60 Umdrehungen ungefähr doppelt so groß war, als bei 30, konnte er sogleich hinzufügen, daß die ablenkende Kraft eines elektrischen Stroms wahrscheinlich direkt proportional der absoluten Menge der durch das Galvanometer hindurchgegangenen Elektrizität sei, unabhängig von deren Intensität. Nun konstruierte er aus zwei in verdünnte Schwefelsäure tauchenden Drähten aus Platin und Zink ein Voltaelement, das die gleiche Ablenkung der Galvanometernadel hervorrief, wie die 7 Flaschen nach 30 Umdrehungen. Faraday berechnete später hieraus, daß die zur Zersetzung eines einzigen Grans (64,798 mg) Wasser erforderliche Elektrizitätsmenge erst durch 800 000 Entladungen der Vergleichsbatterie geliefert werden würde (E. R. 861)! Schon jetzt aber erkannte er, daß die Flaschenbatterie und das Voltaelement nicht nur die gleiche magnetische Ablenkungskraft, sondern auch die gleiche chemische Wirkung auf eine Normallösung von Jodkalium, mit der Reagenzpapier getränkt wurde, ausübten. Es folgte also, „daß in diesem Falle von elektrochemischer Zersetzung, und wahrscheinlich in allen übrigen Fällen, die chemische wie die magnetische Kraft direkt proportional ist der absoluten Menge von durchgeleiteter Elektrizität" (E. R. 377).

Die weiteren Untersuchungen Faradays über den molekularen Zustand der den Strom unter Zersetzung leitenden Körper verknüpften sich mit einer umfassenden Erforschung dieser Beziehung zwischen chemischen und elektrischen Kräften und führten zur Feststellung des überaus wichtigen Gesetzes der festen elektrolytischen Aktion. Seine von ihm wiederholt bedauerte mangelhafte Kenntnis der deutschen Sprache

und der Mathematik machte ihm das Studium der 1827 veröffentlichten Abhandlung von Ohm „Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet“ unmöglich; durch seine experimentelle Geschicklichkeit wurde er jedoch aller Schwierigkeiten Herr, die ihm die Unbekanntschaft mit dem Ohmschen Gesetze gerade hier bereiten mußte. — Da er recht wohl wußte, welche Macht das Wort auf das Gemüt nicht nur, sondern auch auf das Denken der Menschen ausübt, und wie ein Name die Vorstellungen sofort in eine bestimmte Bahn zu lenken vermag, führte er zur Beschreibung und theoretischen Darstellung neuer Forschungsergebnisse stets sorgfältig erwogene, seine Ansichten möglichst deutlich ausdrückende Bezeichnungen ein. Jetzt schenkte er den Physikern die Namen Elektrode, Anode und Kathode, Elektrolyt, elektrolytisch, elektrolysieren, Jon, Anion und Kation, bei deren Bildung er den Rat seines Freundes Whewell, wie bei späteren ähnlichen Veranlassungen benutzte. Bei „Elektrode“ dachte Faraday weniger an den Weg überhaupt, als vielmehr an den Eintritts- und Austrittsweg, an die Tore der im Elektrolyten wirkenden Elektrizität. „Anode“ und „Kathode“ wählte er, weil er wünschte, die Richtung der elektrischen Aktion ohne jede Hypothese über ihre Natur, wie sie die Worte „positiver und negativer Pol“ in sich enthalten, zu bezeichnen. Eine bestimmte Richtung elektrischer Wirkungen ist aber in den nach Ampères Theorie von Osten nach Westen mit dem scheinbaren Laufe der Sonne in der Erde kreisenden Strömen gegeben. Geht der Strom durch einen Elektrolyten in gleicher Richtung, so ist eben die östliche Fläche, der Weg vom Sonnenaufgang, der Weg aufwärts, die Anode, die westliche, der Weg zum Sonnenuntergang oder der Weg niederwärts, die Kathode. Den Namen Elektrolyt verwendete er nur für Körper, die bei der Stromleitung primäre Zersetzungsprodukte liefern; er wird heute

bekanntlich auch im Falle des Auftretens sekundärer Produkte gebraucht. Faraday erklärt schließlich, nicht die Absicht zu haben, diese Ausdrücke häufiger zu gebrauchen, als erforderlich sein werde, da er vollkommen überzeugt sei, „daß Namen und Wissenschaft zweierlei sind" (E. R. 662 bis 666).

Außer einigen Abschnitten der dritten sind sieben Reihen der Experimentaluntersuchungen, nämlich die vierte bis achte und die sechzehnte und siebzehnte, den elektro-chemischen Erscheinungen gewidmet. — Faraday benutzte in der Hoffnung, die vom Strom gelieferten Zersetzungsprodukte auffangen und genauer untersuchen zu können, „Eis und sonstiges Gefrorenes" teils als Querwände in der zu zersetzenden Substanz, teils als Pole, fand aber, wie schon früher Franklin, daß Eis die Voltaelektrizität nicht zu leiten vermag. Weitere Versuche ergaben, daß nicht nur beim Wasser, sondern auch bei einer großen Anzahl anderer Körper das im flüssigen Zustande vorhandene elektrische Leitungsvermögen im erstarrten verloren geht. Die Substanzen, die diese Erscheinung zeigten, waren sämtlich aus solchen Elementen zusammengesetzt, die sich bekanntermaßen bei Zersetzung zu den entgegengesetzten Batteriepolen begeben. „Sobald Leitung stattfand, trat auch Zersetzung ein, und wenn die Zersetzung aufhörte, endete auch die Leitung. Wichtig wurde daher die Frage, ob nicht die Leitung überall, wo das Gesetz besteht, eine Folge sei nicht bloß der Zersetzbarkeit, sondern der wirklichen Zersetzung. Und hieran reiht sich die andere Frage, ob nicht die Erstarrung bloß dadurch die Leitung vernichtet, daß sie die Teilchen unter dem Einfluß der Aggregation an ihrem Orte fesselt und so die endliche Trennung derselben in der für die Zersetzung erforderlichen Weise verhindert" (E. R. 413). Die Verwendung der hochgespannten Elektrizität einer Elektrisier-

maschine an Stelle der Voltaelektrizität sollte die Antwort erteilen. Unter ihrem Einfluß zeigten auch Eis und andere starre Körper ein gewisses Leitvermögen. Andrerseits konnten mit ihrer Hilfe flüssige Elektrolyte ohne Verwendung metallischer Elektroden zersetzt werden. Faraday tränkte ein Stück Kurkumapapier und ein Stück Lackmuspapier, die beide die Gestalt eines schmalen gleichschenkligen Dreiecks mit scharfer Spitze hatten, mit Glaubersalzlösung, legte sie mit ihren Basisteilen übereinander und stellte den nach außen gekehrten Spitzen die Spitzen zweier Nadeln gegenüber, von denen die eine mit dem positiven Konduktor der Elektrisiermaschine durch einen Draht und eine feuchte Schnur, die andere mit einer guten Ableitung nach den Gas- und Wasserröhren von London verbunden war. Lag die Lackmuspapierspitze der positiven, die Kurkumaspitze der negativen Nadelspitze gegenüber, so wurde jene nach wenigen Umdrehungen der Maschine durch frei gewordene Säure, diese durch das Freiwerden von Alkali gerötet (E. R. 465 bis 466). Von Polen im gewöhnlichen Sinne des Wortes konnte bei dieser Versuchsanordnung nicht gesprochen werden. Faraday betrachtete daher das Versuchsergebnis in Verbindung mit einer Reihe ähnlicher als ein gewichtiges Argument gegen die in der Theorie von Grothuß gemachte Annahme, daß die der Zersetzung vorausgehende Drehung der Moleküle im Elektrolyten durch Anziehungskräfte der Polplatten bewirkt werde. Die Zersetzungsprodukte wandern vielmehr nur so lange in der Richtung auf die Elektroden zu, als sie noch Substanzen finden, mit denen sie sich zu verbinden vermögen. Sie werden viel mehr aus den Elektrolyten ausgestoßen, als durch eine Anziehung ausgezogen (E. R. 493 und 537). Der Strom ändert die chemische Verwandtschaft der in oder neben seiner Bahn liegenden Teilchen; diese erlangen dadurch das Vermögen, „in einer

Richtung stärker als in der anderen zu wirken, so daß sie durch eine Reihe folgeweiser Zersetzungen und Wiederzusammensetzungen in entgegengesetzter Richtung fortgeführt und endlich an den in Richtung des Stromes liegenden Grenzen des in Zersetzung begriffenen Körpers ausgetrieben oder ausgeschlossen werden" (E. R. 524).

Die Leitung hochgespannter elektrischer Ströme durch Eis führt schließlich zu einer die Vorgänge der Isolation, der gewöhnlichen und der elektrolytischen Leitung unter einen Gesichtspunkt zusammenfassenden Anschauung. „Belegt man eine Eisplatte auf beiden Seiten mit Platinblech und verbindet diese Belege mit einer fortwährenden Quelle der beiden Elektrizitäten, so wird das Eis gleich einer Leydener Flasche geladen" (E. R. 1164). Eine ähnliche Einwirkung erleidet destilliertes Wasser, wenn es in einem langen schmalen Troge zwischen die Elektroden einer kräftigen Voltaschen Batterie gebracht wird. In diesen Fällen findet durch das Wasser oder Eis oder sonstige „Dielektrikum", wie Faraday ein solches, elektrische Wirkungen übertragendes Mittel bezeichnend genannt hat, hindurch eine Verteilungswirkung statt. Die elektrische Verteilung ist eine Wirkung aneinander grenzender Teilchen und besteht in einer Art Polarisation von ihnen, d. h. in einer „Disposition von Kraft, durch welche dasselbe Molekül entgegengesetzte Wirkungsfähigkeiten an verschiedenen Stellen erlangt (E. R. 1304). Von vornherein enthält jedes Körperteilchen beide Elektrizitäten, sei es als Mengen, sei es als bloße Kräfte, in genau gleichen Beträgen in sich. Unter dem Einflusse der verteilend wirkenden Konduktoren nehmen „die Teilchen positive und negative Punkte oder Stellen" an, „die in bezug aufeinander und die verteilenden Oberflächen oder Teilchen symmetrisch angeordnet sind" (E. R. 1298). Der Zustand ist ein gezwungener, aus dem die Teilchen in ihren normalen oder

natürlichen zurückzukehren suchen. Man kann sich diesen „Spannungszustand“ in ganz ähnlicher Weise wie bei den magnetischen Erscheinungen durch die Annahme verdeutlichen, daß das Dielektrikum von Kraftlinien durchzogen wird, in denen anziehende Kräfte zwischen den Teilchen des Isolators in Richtung der Verteilung, abstoßende quer dazu herrschen (E. R. 1297). Zu ihrer Demonstration brachte Faraday kleine Stückchen weißer Seide in Terpentinöl in einem Glasgefäß, während vermittelst zweier isolierter Drähte die Entladung einer Elektrisiermaschine durch das Terpentin stattfand; die Seidenstückchen bildeten dann zwischen den Drähten einen zähen Streifen (E. R. 1350). Verschiedene andere Versuchsanordnungen Faradays wiesen auf einen krummen Verlauf dieser Linien hin und schlossen dadurch die Vorstellung vom Auftreten statischer Induktionswirkungen ohne wesentliche Beteiligung des zwischen induzierendem und induziertem Körper liegenden Mittels, also Wirkungen in die Ferne, aus.

Einen „sehr kräftigen Beweis“ für die „Theorie, daß das Ganze auf einer Molekularaktion beruhe, nicht auf einer in merkliche Ferne“ erblickte Faraday mit Recht in seiner Entdeckung des *spezifischen Verteilungsvermögens*, das heißt des durch die Dielektrizitätskonstante charakterisierten besonderen Einflusses, den die verschiedenen dielektrischen Körper „auf den Grad der durch sie hin stattfindenden Verteilung ausüben“. Die Frage, deren sorgfältige experimentelle Erörterung ihn diesen schönen wissenschaftlichen Fund machen ließ, lautet in seiner Fassung so: „Gesetzt, A sei eine elektrisierte Platte, aufgehängt in der Luft, B und C seien zwei ganz ähnliche Platten, zu beiden Seiten von A, in gleichen Abständen, parallel mit derselben, unisoliert angebracht. A wirkt dann gleich stark verteilend auf B und C. Wenn nun bei dieser Stellung der Platte irgendein anderes dielektrisches

Mittel als Luft, z. B. Schellack, zwischen A und C gebracht wird, wird dann die Verteilung zwischen ihnen noch dieselbe bleiben? Wird dann das Verhalten von C und B zu A, trotz der Verschiedenheit der zwischen sie eingeschalteten dielektrischen Stoffe, ungeändert bleiben?" (E. R. 1252).

In dem beschriebenen Spannungs- oder Polaritätszustand haben nun die aneinander grenzenden Teilchen der verschiedenen Dielektrika die Fähigkeit, ihre Kräfte einander mitzuteilen, wodurch Entladung eintritt. „Alle Körper scheinen zu entladen, einige in größerem, andere in geringerem Grade, und dadurch werden sie bessere oder schlechtere Leiter, schlechtere oder bessere Isolatoren. Verteilung und Leitung scheinen eins zu sein in der Ursache und der Wirkung, nur daß bei der letzteren ein beiden gemeinsamer Effekt aufs Höchste gesteigert ist, der bei der ersteren, selbst in den besten Fällen, nur in ganz unmerklichem Grade vorkommt" (E. R. 1326). „Je schwächer der Spannungszustand, bei welchem die Entladung zwischen den Teilchen eines Körpers stattfindet, ein desto besserer Leiter ist dieser Körper." Isolatoren sind Körper, deren Teilchen den Polarisationszustand festhalten und infolgedessen eine hohe Spannung annehmen können, Leiter solche, die sich nicht bleibend polarisieren lassen, deren Teilchen daher auch nur geringe Spannung zeigen (E. R. 1338). Die schwache Leitfähigkeit des Schwefels und Schellacks läßt sich mit der vortrefflichen des Kupfers durch eine Reihe von Verbindungsgliedern, wie Glas, Wallrat, Eis, destilliertes Wasser, Salzlösungen, Eisen usw. verknüpfen; in allen diesen Fällen erfordert die Leitung Zeit, eine erhebliche bei den sogenannten Isolatoren, eine sehr kurze, aber doch meßbare bei den besten Leitern. Überall ist ein Widerstand gegen die Leitung vorhanden, der mit der Zeit überwältigt werden kann; seine erhebliche Größe bei den Iso-

latoren offenbart sich in ihrem schwachen Leitungsvermögen, seine Geringfügigkeit bei den guten Leitern in ihrer geringen Isolationsfähigkeit.

Der elektrolytischen Leitung und Entladung geht ebenfalls eine Verteilung im Elektrolyten voraus. Während aber in einem festen Elektrolyten wie Eis dieser Zustand beharrt, erfolgt im flüssigen Zerfällung der polarisierten Teilchen in ihre entgegengesetzt geladenen Bestandteile. Beim Wasser z. B. wandert der Sauerstoff in einer Richtung fort und führt seinen Betrag von der während der Polarisation erlangten Kraft mit sich, „während der Wasserstoff dasselbe in der entgegengesetzten Richtung tut, bis sie beide auf das nächstliegende Teilchen, das in gleichem Zustande wie das von ihnen verlassene ist, treffen und durch Vereinigung ihrer Kräfte mit diesem das hervorbringen, was eine Entladung ausmacht" (E. R. 1347). Wir haben es hier mit einer fortführenden Entladung zu tun. Die Bewegung von Luft- und Staubteilchen, die sich an einer negativen Spitze elektrisch geladen haben und vermöge des Einflusses der verteilenden Kräfte zu der nächsten positiven Fläche wandern, unterscheidet sich in keinem wesentlichen Punkte von der eines in einem Elektrolyten negativ gewordenen Sauerstoffteilchens zur Anode (E. R. 1624).

Eine Bestätigung der Richtigkeit dieser Anschauung über den Vorgang der elektrolytischen Leitung fand Faraday in seinem Gesetz der festen elektrolytischen Aktion. Wenn nämlich wirklich z. B. jedes Kation während der Zersetzung einen bestimmten Betrag Elektrizität entlädt, so muß die Menge der in einer bestimmten Zeit ausgeschiedenen Kationen dem Gesamtbetrage der entladenen positiven Elektrizität, d. h. der Stromstärke proportional sein. Der erste Teil des Faradayschen Gesetzes spricht aber gerade dies in der Formel aus: „Die chemische Kraft eines elektrischen Stromes ist direkt

proportional der absoluten Menge von durchgegangener Elektrizität" (E. R. 783).

Von noch höherer Bedeutung als für jene Verteilungs- und Wanderungstheorie ist dieser Satz für die Erkenntnis der festen zahlenmäßigen Beziehung zwischen elektrischen und chemischen Kräften, namentlich mit der Ergänzung, „daß die Elektrizität, die eine gewisse Menge von Substanz zersetzt, und die, welche bei der Zersetzung derselben Menge entwickelt wird, gleich sind" (E. R. 868). „Der Strom und seine Erfolge sind hier proportional; der eine kann zur Repräsentation des anderen angewandt werden; kein Teil des Effekts von beiden ist verloren oder gewonnen" (E. R. 1621). —

Der Wichtigkeit des Gegenstandes entsprachen die Bemühungen Faradays um seine allseitige gründliche Durchmusterung und Untersuchung. Vor allem schuf er sich in dem bekannten Voltaelektrometer, das er in verschiedenen Formen herstellte, ein Meßinstrument, dessen Zuverlässigkeit er durch die Prüfung und Sicherstellung des Gesetzes der festen elektrolytischen Aktion für Wasser unter Anwendung jeder nur erdenklichen Vorsichtsmaßregel über allen Zweifel erhob. Mit ihm stellte er dann außerordentlich umfangreiche Versuche über das elektrolytische Leitvermögen zahlreicher Körper an, wobei ihm seine unter Davy erworbenen gründlichen chemischen Kenntnisse sehr zu statten kamen. Das Ergebnis war der Nachweis der allgemeinen Gültigkeit des bereits angeführten ersten Teiles des Gesetzes und seine Ergänzung durch den zweiten, daß die „elektrochemischen Äquivalente (E. R. 824), d. h. die relativen Mengen, in denen Anionen und Kationen aus den verschiedensten Verbindungen durch denselben Strom in gleicher Zeit ausgeschieden werden, ihren gewöhnlichen chemischen Äquivalenten proportional sind (E. R. 839).

Die Entdeckung des durch die Dielektrizitätskonstante charakterisierten spezifischen Verteilungsvermögens der Körper und ihre große Bedeutung für die Anschauung von der Kraftübertragung mußte Faraday zu neuen Anstrengungen anspornen, auch bei der elektrodynamischen Induktion den Einfluß des vermittelnden Mediums nachzuweisen. Der Weg und die Fragestellung, die zur Ermittlung der Dielektrizitätskonstanten geführt hatten, brachten hier jedoch kein Ergebnis; eine Veränderung des zwischen den induzierenden und den induzierten Körper eingeschalteten Mittels ließ keinen Einfluß erkennen. Aber rastlos suchte Faradays Geist nach anderen entscheidenden Experimenten. Durch die Entdeckung der Polarisation des Lichts war ja eine Art Verwandtschaft der optischen Vorgänge mit magnetischen und elektrischen aufgewiesen; die Zweiseitigkeit des Lichtstrahls oder der die Lichtschwingungen vermittelnden Ätherteilchen entsprach der magnetischen und elektrischen Polarität! Die gegenseitige Umwandlungsmöglichkeit elektrischer und magnetischer Kräfte stand schon fest; sollte sich nicht auch eine Beziehung zwischen beiden und dem Licht feststellen lassen? Die Polarisation des Lichtes durch Brechung wies entschieden auf einen Einfluß der Teilchen des brechenden Mediums auf den Vorgang hin, und die verschiedenartige Drehung der Polarisationsebene beim Durchgang durch gewisse Substanzen machte eine solche Annahme zur zwingenden Notwendigkeit. Wenn die magnetischen Kraftlinien, durch welche die elektrodynamischen Induktionswirkungen vermittelt werden, in Körpern, die sie durchsetzen, ähnliche Spannungszustände hervorrufen, wie die elektrischen Kraftlinien in den Dielektricis, so ist zu erwarten, daß ein durch jene Körper gleichzeitig hindurchgehender polarisierter Lichtstrahl dadurch irgendwie in Mitleidenschaft gezogen und so zum Verräter des unsichtbaren Vor-

gangs wird. Und so ist es wirklich. Faraday sah endlich seine angestrengten Bemühungen mit Erfolg gekrönt; die 19. Reihe seiner Experimentaluntersuchungen vom Jahre 1845 durfte den Titel tragen: „Über die Magnetisierung des Lichts und die Belichtung der Magnetkraftlinien"; neben die Dielektrika traten die Diamagnetika, d. h. „Körper, die von Magnetkraftlinien durchschnitten werden, ohne durch deren Wirkung den gewöhnlichen magnetischen Zustand von Eisen oder Magneteisenstein anzunehmen" (E. R. 2149).

Eine 16 Jahre zurückliegende Untersuchung Faradays technischer Art über optische Gläser hatte ihn zur Herstellung einer schweren Glassorte geführt, die er nach ihren Hauptbestandteilen als kieselborsaures Bleioxyd bezeichnete. Er legte eine, an den Endflächen polierte, rechteckige Säule aus solchem Glase von 5,078 cm Länge und 1,27 cm Breite und Dicke so an die Pole eines kräftigen Elektromagneten, daß das Lichtbündel einer Argandlampe und die magnetischen Kraftlinien nahezu in gleicher Richtung hindurchgingen. Das Lichtbündel wurde vor Eintritt in die eine polierte Endfläche durch Reflexion an einem schwarzen Spiegel polarisiert und nach Austritt aus der anderen durch einen Nichol analysiert. Der Analysator wurde vor Einschaltung des Stroms zunächst so gedreht, daß das Licht des Argandbrenners verschwand, wobei es gleichgültig war, ob das Glasstück sich im Strahlengang befand oder nicht. Jede Betätigung des Stroms aber brachte das Bild des Argandbrenners zum Vorschein, seine Unterbrechung ließ es wieder verschwinden. Die magnetischen Kräfte bewirken also in der Tat eine Drehung der Polarisationsebene des Lichts. Faraday stellte durch weitere Versuche fest, daß zwar der Betrag dieser Drehung vom Stoffe des Diamagnetikums abhängt, nicht aber ihre Richtung, die vielmehr lediglich durch die Richtung der wirksamen Kraftlinien bedingt ist.

„Wäre eine Taschenuhr das Diamagnetikum, stände der Nordpol eines Magnets vor dem Zifferblatt und der Südpol hinter der Rückseite, so würde die Bewegung der Zeiger die Richtung andeuten, in welcher ein Lichtstrahl bei der Magnetisierung gedreht wird“ (E. R. 2161), der in das Auge eines auf das Zifferblatt blickenden Beobachters eintritt. Die Drehung wächst mit der Länge des durchlaufenen Diamagnetikums und mit der Stärke der Magnetkraftlinien, ist aber unabhängig von einem etwaigen natürlichen Drehvermögen des Diamagnetikums für Licht. Ihre Herbeiführung durch die magnetischen Kräfte geht besonders deutlich aus dem Umstande hervor, daß zur vollen Entwicklung der Erscheinung eine gewisse Zeit erforderlich ist; das ist eben die Zeit, die der Eisenkern nach Schließung der Batterie zur Erlangung seiner vollen magnetischen Stärke bedarf (E. R. 2170). Die Drehung der Polarisationsebene ließ sich auch durch Solenoide hervorrufen, in welche die Diamagnetika als Kerne gesteckt wurden; „wird ein polarisierter Lichtstrahl in einer auf seiner Richtung winkelrechten Ebene von einem elektrischen Strom umkreist, so erfolgt eine Drehung des Strahls um seine Achse in gleicher Richtung mit der Richtung des Stroms“ (E. R. 2197), ein neuer Beleg für die Richtigkeit der Ampèreschen Theorie des Magnetismus.

Mit Befriedigung stellt Faraday fest, daß durch diese Beziehungen zwischen Licht und magnetischen und elektrischen Kräften „den Tatsachen und Betrachtungen, die zu zeigen trachten, daß alle Naturkräfte mit einander verknüpft sind und einen gemeinschaftlichen Ursprung haben“, ein wichtiger Zusatz hinzugefügt ist (E. R. 2211). Aus der Tatsache, daß er die Erscheinungen im Vacuum, übrigens auch in Luft und anderen Gasen, nicht beobachten konnte, und aus ihrer gradweisen Verschiedenheit bei verschiedenen

Stoffen entnahm er zugleich einen neuen Beweis für seine Lehre der Kraftübertragung von Teilchen zu Teilchen; die magnetischen Kräfte wirken auf den Lichtstrahl nur durch Vermittlung der Substanz, in der sie und der Strahl gleichzeitig existieren, also nur durch Dazwischenkunft der Materie.

Aber sogleich sieht der rastlos vorwärts strebende Geist und die lebhafte Einbildungskraft Faradays neue Ziele vor sich. Wenn die magnetischen Kräfte den Lichtstrahl nur durch die Vermittlung eines materiellen Mediums zu beeinflussen vermögen, so werden sie vermutlich in diesem Mittel irgendwelche Zustandsänderungen hervorrufen. Diese Einwirkung auf das Diamagnetikum wird dann zweifellos auch im Dunkeln vorhanden sein, sie wird sich auch bei undurchsichtigen Körpern nachweisen lassen müssen, „obwohl die vom Licht hervorgebrachten Erscheinungen bis jetzt die einzigen Mittel darzubieten scheinen, die Abänderung der Konstitution zu beobachten" (E. R. 2226). Die molekulare Beschaffenheit der Diamagnetika in diesem Zustand muß von der magnetischen Eisens und anderer magnetischer Substanzen spezifisch verschieden, „es muß ein neuer magnetischer Zustand sein" (E. R. 2227).

Durch besonders kräftige Elektomagnete und vor allen Dingen durch seine unübertreffliche Experimentierkunst gelang es Faraday noch 1845, diese Überzeugung als richtig zu erweisen und den neuen Zustand vollkommen klar zu charakterisieren. Er entdeckte den Diamagnetismus, über dessen Äußerungen die 20. bis 23. Reihe der Experimentaluntersuchungen handelt. Wieder wurde der erste erfolgreiche Versuch mit dem Glasstab aus kieselborsaurem Bleioxyd angestellt. Faraday hing ihn zentral zwischen den Polen eines starken Elektromagneten auf; bei Stromschluß drehte er sich in eine gegen die Magnetkraftlinien senkrechte Lage, er stellte sich nicht „achsial", wie Eisen, sondern „äqua-

torial" nach Faradays Ausdrucksweise (E. R. 2252 u. 2253). Allerdings erwies sich auch die achsiale Lage als eine Gleichgewichtslage, jedoch als eine labile, die geringste Drehung des Stabes aus ihr führte ihn in die stabile äquatoriale Stellung. Die überwiegende Mehrzahl der bekannten Körper, namentlich auch alle organischen, zeigten die gleiche diamagnetische Eigenschaft; Holz, Fleisch, ein Apfel unterliegen diesem seltsamen Einfluß der magnetischen Kräfte; ein im magnetischen Felde hinlänglich empfindlich aufgehängter Mensch würde sich äquatorial stellen, „denn alle Substanzen, aus denen er gebildet ist, mit Einschluß des Bluts, besitzen diese Eigenschaft" (E. R. 2281). Weitere Versuche ergaben, daß die Drehung eines Stabes in den Äquator als das komplizierte Ergebnis der Einwirkung der magnetischen Kräfte auf die einzelnen Teile des Stabes anzusehen ist; an einem Würfel oder einer Kugel erblickte man, namentlich bei Verwendung nur eines Magnetpols, deutlich das Streben einer Auswärtsbewegung in Richtung der Magnetkraftlinien von Stellen stärkerer Kraft zu solchen schwächerer, also einen schwacher Abstoßung ähnelnden Vorgang. Besonders gut zeigte sich diese Erscheinung bei Wismut; eine Wismutkugel wurde von einem Pole stets in der Richtung fortgetrieben, die am schnellsten von den stärkeren zu den schwächeren Punkten der magnetischen Kraft hinführte; ja, mit feingepulvertem Wismut auf Papier über einem Magnetpol konnte Faraday eine Art diamagnetischer Kurven erzeugen (E. R. 2304).

Von besonderem Interesse war die Beobachtung, daß sich eine mit Eisenvitriollösung gefüllte Glasröhre achsial stellt, wenn man sie im Felde mit einer Eisenvitriollösung von schwächerer Konzentration umgibt, dagegen äquatorial, wenn die umgebende Lösung konzentrierter ist (E. R. 2367). Bald nämlich konnte Faraday feststellen, daß es sich hierbei

um einen Vorgang von sehr allgemeiner Bedeutung handle. Danach besitzt der leere Raum den magnetischen Nullzustand; die Anzahl der in ihm durch einen Quadratzentimeter hindurchgehenden Kraftlinien kann als Ausgangspunkt der Zählung für eine Skala dienen, auf deren positiver Seite die paramagnetischen Substanzen, wie Eisen, Nickel, Kobalt, auf deren negativer Seite die diamagnetischen stehen. Durch jene gehen mehr, durch diese weniger Kraftlinien als durch das Vakuum. Jedes Glied der Skala verhält sich in einem Medium aus dem darüberstehenden diamagnetisch, aus dem darunterstehenden paramagnetisch.

Die verschiedenen Gase und Dämpfe schienen sich zunächst wie der leere Raum zu verhalten. Aber durch Nachprüfung der Versuche von Zantedeschi und Bancalari über die diamagnetischen Eigenschaften der Flammen und der Gase konnte Faraday nicht nur die Ergebnisse dieser Forscher bestätigen, sondern auch den Nachweis führen, daß die meisten gasigen Körper der magnetischen Kraft unterworfen sind und Sauerstoff, der sich in gewöhnlicher Luft magnetisch zeigt, unter allen Gasen die schwächste diamagnetische Kraft besitzt. Zugleich ergaben diese äußerst subtilen Experimente eine sehr merkwürdige unmittelbare Beziehung zwischen Wärme und Magnetismus, da Erhöhung der Temperatur die diamagnetischen Eigenschaften der Gase sichtlich steigerte und sich z. B. kältere Luft in wärmerer magnetisch verhielt, nämlich der Magnetachse näherte.

Schließlich fand Faraday an Wismut- und andern Kristallen auch noch Beziehungen zwischen der Kristallstruktur und den magnetischen Kräften; die Leitungsfähigkeit dieser Körper für die Kraftlinien war in verschiedenen Richtungen verschieden (22. und 23. Reihe der E. R).

Wahrlich, Faraday durfte auf die erlangten Einsichten stolz sein! Er konnte nicht nur mit größerer Befriedigung

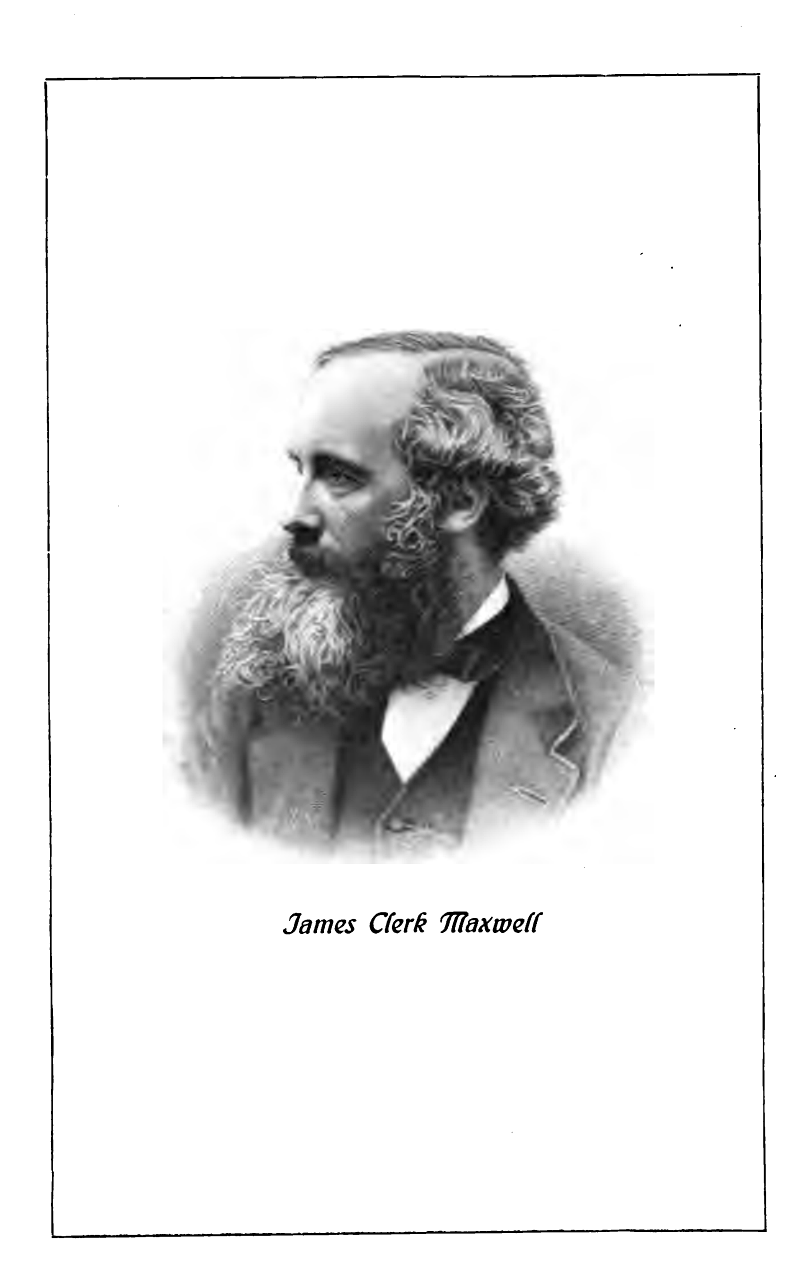
auf seine Theorie der elektrischen Verteilung blicken, nachdem die Entdeckung des Diamagnetismus das Vorhandensein eines besonderen Zustandes aufgewiesen hatte, der wohl geeignet schien, die elektrodynamischen Seitenwirkungen von Strömen auf die Wirkung benachbarter Teilchen zurückzuführen (E. R. 2443); auch seine Überzeugung von der Einheit der Naturkräfte hatte durch ihn selbst die schönsten Bestätigungen erhalten. „Vor wenig Jahren noch", sagt er, „war uns der Magnetismus eine dunkle, nur auf wenige Körper wirkende Kraft; jetzt wissen wir, daß er auf alle Körper wirkt und in innigster Beziehung steht zur Elektrizität, Wärme, chemischen Aktion, zum Licht, zur Kristallisation und durch diese wiederum zu den Kohäsionskräften. Bei solchem Zustande der Dinge mögen wir uns wohl angetrieben fühlen, unsere Arbeiten fortzusetzen, ermutigt durch die Hoffnung, den Magnetismus selbst mit der Gravitation in Verbindung zu setzen" (E. R. 2614).

Diese Hoffnung hat sich bisher nicht erfüllt, aber ihre Äußerung ist bezeichnend für Faradays Neigung, weittragende Spekulationen an die Ergebnisse seiner Experimente zu knüpfen. Wiederholt war er bemüht, eine kosmische Bedeutung seiner Laboratoriumsversuche festzustellen. Oft schließen seine Berichte an die Royal Institution mit darauf gerichteten Bemerkungen. So sieht er es als eine theoretisch notwendige Folgerung aus seinen Untersuchungen über die Induktionsströme an, daß solche Ströme überall entstehen müssen, wo Wasser fließt. Denn „wenn man sich eine Linie von Dover nach Calais durch das Wasser gezogen denkt, die unter dem Wasser zu Lande nach Dover zurückkehrt, so bildet sie einen Kreis aus leitender Materie, von der, wenn das Wasser sich auf und ab bewegt, ein Teil die magnetischen Kurven der Erde schneidet, während der andere relativ in Ruhe ist" (E. R. 190). Mit entsprechenden

Vorgängen mag selbst die Entstehung der Polarlichter zusammenhängen (192). Der letzte Satz der 19. Reihe, in der die Drehung der Polarisationsebene des Lichtes durch die Magnetkraft zur Erörterung kommt, lautet: „Was der mögliche Effekt der Kraft in der Beziehung der Sonne zur ganzen Erde oder zu Magneten sei, und wie sich Elektrizität und Magnetismus am besten durch Licht entwickeln lassen, sind Gedanken, die mir beständig im Sinne liegen; doch es wird besser sein, Zeit und Gedanken, unterstützt von Experimenten, auf die Erforschung und Entfaltung reeller Wahrheit, als zur Aufsuchung bloßer Suppositionen zu verwenden." Eigenartige Erwägungen über die Bedeutung des Diamagnetismus im Haushalt der Natur, über den Erdmagnetismus und seine mögliche Beeinflussung durch die Sonne enthalten auch die letzten Paragraphen der 21. Reihe. Die bisher festgestellten diamagnetischen Wirkungen erscheinen freilich sehr geringfügig. Vielleicht aber werden später kräftigere Betätigungsweisen gefunden werden. Da sich die in ihnen offenbarende Kraft „Naturkörpern gegeben ist, so kann nicht einen Augenblick angenommen werden, daß sie überflüssig oder unzulänglich oder unnötig sei. Ohne Zweifel hat sie ihren angewiesenen Zweck, und zwar in bezug auf die gesamte Erdkugel; und wahrscheinlich ist wegen ihrer Beziehung zu der gesamten Erde ihre Stärke notwendig so gering (um so zu sagen) in den Portionen der Materie, die wir handhaben und dem Versuch unterwerfen" (E. R. 2441). Bedenken wir, welche ungeheure Mengen diamagnetischer Substanzen die Erdrinde bilden, hier von magnetischen Kurven durchzogen und dadurch in einen beständigen Spannungszustand versetzt werden, „so dürfen wir nicht zweifeln, daß dadurch für dieses System und für uns, seine Bewohner, ein großer Zweck des Nutzens erfüllt ist, den zu ergründen wir nun das

Vergnügen haben werden" (E. R. 2447). Und „wäre der Saturn ein Magnet, wie es die Erde ist, und sein Ring bestände aus diamagnetischen Stoffen, so würden die magnetischen Kräfte ihm die Lage zu geben suchen, die er wirklich besitzt" (2450). — Auch hier sieht man wieder, daß die Kluft zwischen Faradays Stellung zur Religion und zur Wissenschaft doch nicht so völlig unüberbrückt blieb, wie es seine Biographen darstellen und namentlich Tyndall in den Worten ausgedrückt hat: „Wenn Faraday seine Gebettür öffnete, so schloß er seine Laboratoriumstür zu." Seine unbedingte gläubige Hingabe, sein entschiedener Verzicht auf jede Kritik der biblischen Offenbarung entsprang sicher nur dem richtigen Empfinden von der Grundverschiedenheit der Forderungen unseres Gemüts und unseres Verstandes. Das wissenschaftliche Streben ist beständig vom Irrtum bedroht, aber der Glaube ist eine gewisse Zuversicht des, das man hoffet und nicht zweifelt an dem, das man nicht siehet (Ebr. 11, 1) und in seiner, inneren Frieden verleihenden Kraft daher durch keine Philosophie zu ersetzen.

Faraday hat die zu seiner Zeit noch allgemein verbreitete Erklärung der elektrischen und magnetischen Erscheinungen durch ein oder zwei, mit der Fähigkeit unvermittelter Fernwirkungen begabte Fluida unmöglich gemacht und die Grundzüge eines neuen Bildes der Vorgänge entworfen, dessen Einzelheiten dann von Cl. Maxwell mit Hilfe der mathematischen Analyse gezeichnet worden sind. In seinem Lehrbuch der Physik hat Chwolson (IV, 1 Einleitung) lichtvoll auseinandergesetzt, warum und in welchem Umfange wir uns trotzdem noch der dem älteren Bilde (Bild A) angehörenden Ausdrücke bedienen dürfen. An dem Bilde selbst festzuhalten, wäre aber ein „Anachronismus". Das neue Bild (B) hat die theoretische Vorhersage von zwei,



James Clerk Maxwell

durch zahlreiche Versuche nachträglich bestätigten Gesetzen ermöglicht, die das Bild A nicht einmal zu erklären vermöchte. Das eine dieser Gesetze $K = n^2$ gibt die Beziehung zwischen der Dielektrizitätskonstanten K und dem Brechungsquotienten n von Strahlen sehr großer Wellenlänge, das andere drückt die Lichtgeschwindigkeit durch die Anzahl der in der elektromagnetischen Einheit enthaltenen elektrostatischen Einheiten der Elektrizität aus. Eine Theorie, die aus ihren Voraussetzungen diese beiden Gesetze nicht ableiten kann, ist lebensunfähig. Außerdem stehen die Erscheinungen der elektrischen Strahlen von Hertz mit den Grundvorstellungen des Bildes B in bester Übereinstimmung; das Bild A vermag mit ihnen nichts anzufangen.

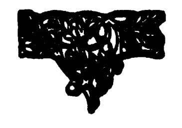
Aber trotz dieser Überlegenheit des Bildes B über das Bild A hat sich die Physik seit dem Jahre 1900 genötigt gesehen, ein drittes Bild C, die Elektronentheorie, auszugestalten. Drei Ursachen waren dabei nach Chwolsons Darlegungen wirksam. Erstens fielen von vornherein die elektrolytischen Vorgänge völlig aus dem Rahmen des Bildes B heraus; es wurde kein Versuch gemacht, die mit den dissoziierten Jonen verbundenen Elektrizitätsmengen durch Spannungszustände des die Jonen umhüllenden Äthers zu erklären. Zweitens gelang es nicht, klare mechanische Vorstellungen von den Deformationen und Strömungen des Äthers auszuarbeiten, die den elektrostatischen und magnetischen Erscheinungen entsprechen sollen. Drittens war eine Reihe neu entdeckter Vorgänge durch das Bild B nicht verständlich zu machen. Das Bild C übernimmt aus A die Stoffnatur der negativen Elektrizität, die in den „Elektronen" mit der gewöhnlichen Materie vergesellschaftet ist, vielleicht sogar diese völlig aufbaut. Mit dem Bilde B hat es die Ablehnung der Fernwirkung gemeinsam; sowohl die elektrischen als auch die magnetischen Kräfte beruhen

auf Veränderungen im Äther, die dort durch unbewegte, hier durch bewegte Elektronen hervorgerufen werden. Die Untersuchung der radioaktiven Substanzen hat dieser neuen Theorie besonders wertvolle Bausteine geliefert, als abgeschlossen kann sie indessen auch heute noch nicht gelten.

Es wäre übrigens nicht schwer, Äußerungen von Faraday anzuführen, die sich als Hindeutungen auf den Begriff des Elektrons auslegen lassen (z. B. E. R. 1503). Aber man darf dem keine allzugroße Bedeutung beimessen. Zum Lichte sich emporringende neue Erkenntnisse sind stets mit einer gewissen Unbestimmtheit behaftet. Je reicher die Einbildungskraft und je umfassender die Tatsachenkenntnis des Geistes ist, der sie entwickelt, desto weniger wird er sie in feste Formen gießen, desto mehr unwillkürlich im Flusse, in bildsamem Zustande erhalten. Noch nicht werden ängstlich die Berechtigungen der verschiedenen Gesichtspunkte gegeneinander abgewogen, unter denen sich ein und derselbe Vorgang betrachten läßt. Die im heißen Schöpferdrange hervorgebrachten Neubildungen verkörpern in sich die verschiedensten Anpassungsmöglichkeiten für den unvermeidlichen Kampf ums Dasein. Das Erzeugnis des Genius gleicht einem Diamanten, der in vielen Farben sprüht; jeder kann in ihm seine Lieblingsfarbe erblicken. Daraus erklärt es sich, daß von jeher die wahrhaft Großen des Menschengeschlechtes für sehr verschiedenartige, ja oft entgegengesetzte Bestrebungen als Eideshelfer herangezogen werden durften, daß von den Epigonen jeder das bei ihnen fand, was er gerade suchte.

Wir verzichten aus diesem Grunde darauf, den Andeutungen des Bildes C bei Faraday näher nachzugehen; sie weisen nur auf die unfertigen Stellen in seinen theoretischen Ansichten hin, auf die Punkte, in denen er sich selbst

vollkommene Klarheit noch nicht zu verschaffen vermochte. Er selbst legte Hypothesen nur einen bedingten Wert bei; sind sie unzutreffend, so bilden sie leicht einen gefährlichen Hemmschuh für den Fortschritt der Wissenschaft; ihre Terminologie vermag den Geist in schwer zu lösende Fesseln zu schlagen. Deshalb verfuhr er mit der größten Vorsicht beim Aussuchen neuer Bezeichnungen für seine Begriffe und war jederzeit bereit, seine Erklärungen preiszugeben, wenn sie in Widerspruch mit den Tatsachen gerieten. Desto höheres Gewicht aber maß er der unbedingten Zuverlässigkeit der von ihm festgestellten Tatsachen bei; hier trat er jeder Anzweiflung seiner Ergebnisse mit Entschiedenheit entgegen, und er behielt fast immer recht. Mit lebenswahren Strichen hat Faraday einst in einer Vorlesung über die Materie sein Selbstbildnis entworfen: „Der ist der weiseste Philosoph, der an seiner Theorie mit einigem Zweifel festhält, der imstande ist, sein Urteil und sein Selbstvertrauen nach dem Werte des Beweises abzumessen, der ihm vorgelegt wird, der eine Tatsache für eine Tatsache nimmt, eine Voraussetzung für eine Voraussetzung, und der seinen Geist so fern wie möglich von der Quelle des Vorurteils hält, oder wenn er dies nicht zu tun vermag (wie im Falle einer Theorie), wenigstens daran denkt, daß solch eine Quelle vorhanden ist." Das ist die Charakteristik der wissenschaftlichen Persönlichkeit Faradays.



6. Robert Mayer.

In der Physik ist die Zahl alles.
R. Mayer.

Die Bestrebungen, die Natur als eine Einheit, als ein schön geordnetes Ganzes, als Kosmos zu begreifen und sich und anderen verständlich zu machen, reichen bis in die Kindheitsgeschichte der Wissenschaft zurück. In den alten Sagen von Weltenschöpfungen fanden sie ihren frühesten, poesieumwobenen Ausdruck. Ihre erste wissenschaftliche Fassung erhielten sie durch die ionischen Naturphilosophen Thales, Anaximander und Anaximenes, die das Wasser, das Unbegrenzte oder die Luft als den Urstoff bezeichneten, aus dem alles Sein abzuleiten sei, wie es in ihn auch wieder zurückkehren müsse. Noch abstrakter wurde die Fassung des Einheitsgedankens in der Atomlehre Demokrits, die in den Händen der Chemie zu einer bedeutungsvollen Veränderung des Begriffes der Elemente und einem ersten umfassenden Naturgesetz führte. Erde, Wasser, Luft und Feuer waren in der Naturwissenschaft des Altertums und Mittelalters mehr Bezeichnungen von Eigenschaften oder Kräften als von Stoffen; das Wasser tauscht Kälte gegen Wärme ein und wird dadurch zu Luft, oder Trockenheit gegen Feuchte und wird dadurch zu Erde. Die Atome und Elemente der Chemie dagegen sind Mischungsbestandteile, aus denen sich jede Materie in bestimmten Zahlen- und Gewichtsverhältnissen zusammensetzt. Erst an dieser Auffassung ließ sich ein unzweideutiger Sinn des Gesetzes von



Robert Mayer

NSchB 4: Keferstein, Große Physiker

der Erhaltung des Stoffes gewinnen, das als dunkle Ahnung schon bei den Griechen das Denken über die Natur beherrschte. Nachdem Lavoisier auch für den Verbrennungsvorgang, der nach dem Sinnenschein jenem Gesetze am stärksten widerspricht, die Unveränderlichkeit des Gewichtes der bei der Oxydation beteiligten Stoffmengen nachgewiesen hatte, war an der Erhaltung der, das Gewicht bestimmenden Masse nicht mehr zu zweifeln, und das erste große Naturgesetz gefunden.

Durch eine eigentümliche Verkettung von Umständen verknüpft sich die erste ziffernmäßige Begründung des zweiten Erhaltungsgesetzes der Naturwissenschaft, des Gesetzes von der Konstanz der Energie im Weltall, gleichfalls mit Untersuchungen von Lavoisier. Wir haben schon gehört, daß die Idee der Kraftverwandlung seit den dreißiger Jahren des Jahrhunderts 18 infolge zahlreicher Versuchsergebnisse unter den Physikern weite Verbreitung gefunden hatte. Aber eine mathematische Formulierung der Beziehungen zwischen den einzelnen Naturkräften war noch nicht entdeckt. Noch war die Aufstellung des Satzes von den lebendigen Kräften, d. h. der Gleichheit zwischen einer bestimmten lebendigen Kraft und einer gewissen Arbeit, z. B. zwischen der lebendigen Kraft einer aus der Höhe h gefallenen Masse m, die durch den Fall die Endgeschwindigkeit v erlangt hat und der Arbeit, die zum Hinaufschaffen des Gewichtes $p = mg$ auf die Höhe h erforderlich ist ($\frac{1}{2} mv^2 = ph$), der einzige erfolgreiche Schritt in dieser Richtung. Ein Maß aber für die bei nicht rein mechanischen Kraftverwandlungen umgesetzte Größe fehlte. Selbst in der rein qualitativen Anwendung des Satzes von der Unzerstörbarkeit der Kraft verfuhr man durchaus nicht mit voller Strenge. Daß Kraft nie und nirgends aus nichts entstehen könne, wurde allerdings bei allen physikalischen

Untersuchungen vorausgesetzt, daß aber ihr Verschwinden ebenso unbedingt ausgeschlossen sei, galt keineswegs als unverbrüchliches Axiom. Die Unmöglichkeit eines perpetuum mobile wurde von keinem Physiker mehr bestritten; hatte die Pariser Akademie doch schon 1775 beschlossen, vermeintliche Lösungen dieses Problems nicht mehr anzunehmen. Ernstliche Nachforschungen nach dem Verbleib der bei Reibung oder Stoß verschwindenden lebendigen Kräfte der Bewegung waren dagegen noch kaum angestellt; selbst einem Newton hatte ihr anscheinendes Verschwinden keine Bedenken erregt. Rumford gelang es allerdings 1798, durch Drehung eines stumpfen Bohrers, der durch schwere Gewichte gegen den Boden einer aus Kanonenmetall hergestellten Form gepreßt wurde, mittelst Pferdekraft eine beträchtliche Menge Wasser bis zur Siedehitze zu erwärmen, und Davy brachte 1799 unter dem Rezipienten einer Luftpumpe zwei Eisstücke durch gegenseitige Reibung zum Schmelzen. In beiden Fällen stammte die auftretende Wärme nachweislich weder aus der Umgebung noch aus den beim Vorgang unmittelbar beteiligten Körpern; zur Erklärung ihrer Herkunft blieb nur die aufgewendete Bewegung übrig. Auch die bei der Absorption von Lichtstrahlen und bei dem Durchgang elektrischer Ströme durch Leiter hervortretenden Temperaturerhöhungen wiesen unwidersprechlich auf die Möglichkeit der Erzeugung von Wärme hin. Aber so entschieden auch diese Feststellungen gegen die Auffassung der Wärme als eines materiellen Agens sprachen, einen sicheren Beweis für die Umsetzbarkeit von Bewegung oder anderer Energiearten in Wärme brachten sie nicht bei. Ein solcher konnte nur durch das Aufzeigen einer Maßbeziehung zwischen der verschwundenen oder verbrauchten und der neu auftretenden Energieform geliefert werden. Das Verdienst, eine solche Zahlenbestimmung

aus einwandfreien Überlegungen zuerst abgeleitet zu haben, fällt Robert Mayer zu (geb. 1814, gest. 1878 in Heilbronn).

In der Schrift von 1850 „Bemerkungen über das mechanische Äquivalent der Wärme“ berichtet R. Mayer selbst über den Anlaß zu seiner Entdeckung folgendes: „Im Sommer 1840 machte ich bei Aderlässen, die ich auf Java an neuangekommenen Europäern vornahm, die Beobachtung, daß das aus der Armvene genommene Blut fast ohne Ausnahme eine überraschend hellrote Färbung zeigte. Diese Erscheinung fesselte meine volle Aufmerksamkeit. Von der Theorie Lavoisiers ausgehend, nach welcher die animalische Wärme das Resultat eines Verbrennungsprozesses ist, betrachtete ich die doppelte Farbenveränderung, welche das Blut in den Haargefäßen des kleinen und großen Kreislaufes erleidet, als ein sinnlich wahrnehmbares Zeichen, als den sichtbaren Reflex einer mit dem Blute vor sich gehenden Oxydation. Zur Erhaltung einer gleichförmigen Temperatur des menschlichen Körpers muß die Wärmeentwicklung in demselben mit seinem Wärmeverluste, also auch mit der Temperatur des umgebenden Mediums notwendig in einer Größenbeziehung stehen und es muß daher sowohl die Wärmeproduktion und der Oxydationsprozeß, als auch der Farbenunterschied beider Blutarten im ganzen in der heißen Zone geringer sein, als in kälteren Gegenden.“ Nun geht die physiologische Verbrennungstheorie von dem Grundsatze aus, daß die durch Verbrennung einer bestimmten Menge Materie gelieferte Wärmemenge eine durchaus unveränderliche Größe ist, also auch durch die Lebensvorgänge nicht beeinflußt wird. Sie fügt dem hinzu, daß die im Organismus direkt entwickelte und beständiger Abgabe an die kältere Umgebung unterliegende Wärme einzig und allein von dem im Körper

verbrannten Material herrührt, niemals aber aus Nichts erzeugt wird. Der Organismus vermag aber auch auf indirektem Wege Wärme hervorzubringen, nämlich auf mechanischem Wege, durch Reibung u. dgl. mit Hilfe seiner Bewegungswerkzeuge. Soll an der Unmöglichkeit der Erschaffung von Wärme aus dem Nichts festgehalten werden, so bleibt nur übrig, auch die mechanisch entwickelten Wärmemengen jenem Verbrennungsvorgang im Körper in Rechnung zu stellen. Diese Mengen müssen dann aber ebenfalls unabhängig von dem Bau und der Wirkungsart der, ihrer Gewinnung dienenden, mechanischen Vorrichtungen sein, da man ja sonst bei gleichbleibendem organischen Verbrennungsprozesse verschieden große Wärmemengen produzieren könnte. Es folgt also, „daß die vom lebenden Körper erzeugte mechanische Wärme mit der dazu verbrauchten Arbeit in einem unveränderlichen Größenverhältnisse stehen muß“, und da zwischen der mechanischen Leistung des Tierkörpers und zwischen anderen, anorganischen Arbeitsarten kein wesentlicher Unterschied besteht, so ist „eine unveränderliche Größenbeziehung zwischen der Wärme und der Arbeit ein Postulat der physiologischen Verbrennungstheorie“.

Es galt nun weiter an einem geeigneten, möglichst einfachen und übersichtlichen Vorgange diese Beziehung zu ermitteln. R. Mayer wählte ein Gedankenexperiment, d. h. eine in die Form eines Versuchs gekleidete Kette von Schlußfolgerungen aus sicher festgestellten Tatsachen. Er berechnete die Wärmemenge, die „latent“ oder aufgewendet wird, wenn sich ein Gas unter gleichbleibendem Druck ausdehnt. Gang und Ergebnis der Rechnung sind in der ersten Veröffentlichung Mayers zu diesem Gegenstande, den „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur“ (Annalen der Chemie und Pharmacie von Wöhler

und Liebig, 1842, Bd. XLII) nur ganz kurz angedeutet; die Erwärmung eines Gewichtsteils Wasser von 0° auf 1° wird hier als entsprechend der Arbeitsleistung bei dem Herabsinken eines gleichen Gewichtsteils aus etwa 365 m Höhe gefunden. Genauere Angaben und zugleich eine richtigere Zahl, nämlich 425 m, bringt die zweite Abhandlung von 1845: „Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel. Ein Beitrag zur Naturkunde.“ Die dort mitgeteilte Berechnung ist in der Mehrzahl der physikalischen Lehrbücher zu finden und kann daher hier füglich als bekannt vorausgesetzt werden.

Die Genialität der Leistung R. Mayers tritt erst dann in vollem Glanze hervor, wenn man sich vergegenwärtigt, daß er zunächst ermitteln mußte, was für einer Art von mechanischer Größe eine Wärmemenge gleichartig zu setzen ist. Die Physiker seiner Zeit waren zwar von der Möglichkeit der Umwandlung aller Kräfte ineinander vollkommen überzeugt, sie sahen Bewegungsvorgänge in magnetische Erscheinungen, diese wieder in elektrische Ströme, die Ströme in chemische und in Licht- und Wärmewirkungen sich umsetzen und umgekehrt. Aber wie war die verschwundene Bewegung zu messen, und was entsprach ihr in ihrer neuen Erscheinungsform? An der genauen begrifflichen Erfassung des senkrecht aufwärts gerichteten Wurfs klärte sich R. Mayers Gedankengang und gelangte zu seiner entscheidendsten Wendung in der Erkenntnis, daß Bewegung nicht die einzige Form der mechanischen Kräftebetätigung sei (nach E. Dühring). Auch *Gewichtserhebung ist Kraft*. Durch die Kraft der Bewegung steigt eine Masse aufwärts; war ihr eine Anfangsgeschwindigkeit von 9,8 m erteilt, so legt sie einen Weg von 4,9 m zurück und kommt schon nach 1 Sekunde zur Ruhe. Aber ebenso wie die Erschaffung, liegt die „*Vernichtung* einer Kraft außer dem

Bereiche menschlichen Denkens und Wirkens". Jene Kraft der Bewegung ist jetzt nur verwandelt, gewissermaßen latent, sie ist zu Fallkraft geworden, die nun wieder Bewegung erzeugen kann. Die gehobene Last ist eine Kraft; allgemeiner: „räumliche Differenz ponderabler Objekte ist eine Kraft". Wenn aber in dem betrachteten besonderen Beispiele latente bewegende Kraft gleich Fallkraft gesetzt werden darf, so wird die Größe dieser Fallkraft auch das zutreffende Maß der bei anderen Vorgängen verschwindenden Bewegung abgeben; sie also ist das mechanische Äquivalent der bei Reibung, Stoß u. dgl. auftretenden Wärmemenge, die ihrerseits in bekannter Weise nach Kalorien zu bestimmen ist. So ungefähr stellt sich uns die Ideenfolge dar, die ihren äußeren Abschluß in der numerischen Bestimmung des Wärmeäquivalents, in der Gleichung gefunden hat: „1 Kalorie äquivalent der Arbeit von 427 Meterkilogrammen", wie wir nach dem gegenwärtigen Stand der Wissenschaft schreiben müssen.

Der Satz von den lebendigen Kräften berechtigt natürlich ohne weiteres dazu, diese Äquivalenzbeziehung zwischen einer Wärmemenge und einer Arbeitsgröße auch als eine solche zwischen Wärme und der durch eine Fallbewegung erlangten lebendigen Kraft auszudrücken; es ergibt sich dann eine Kalorie als gleichwertig mit der lebendigen Kraft einer Kilogramm-Masse, die eine Endgeschwindigkeit v von rund 91 m erlangt hat, da zwischen v und der Fallstrecke s die Gleichung $v = \sqrt{2gs}$ besteht.

Bemerkenswert ist es, daß R. Mayer aus der Umsetzbarkeit von Bewegung in Wärme keineswegs den heutzutage fast als selbstverständlich betrachteten Schluß gezogen hat, daß die Wärme selbst in einem Bewegungsvorgange bestehe. Nur bei der Entstehung von Wärme durch Strahlung ließ er die Beteiligung von Ätherschwingungen gelten, im

übrigen verhielt er sich der kinetischen Wärmetheorie gegenüber geradezu ablehnend. Selbst für jenen Fall aber war er der Meinung, „daß, um zu Wärme werden zu können, die Bewegung — sei sie eine einfache oder eine vibrierende, wie das Licht, die strahlende Wärme usw. — aufhören müsse, Bewegung zu sein,“ eine Ansicht, die sich mit der von Chwolson in seinem prächtigen Lehrbuche der Physik aufgestellten einigermaßen berührt, daß strahlende Energie in keinem Falle schon Wärme sei. Die Vorsicht Mayers in diesem Punkte, die wohl mit seiner Abneigung gegen Hypothesenbildung zusammenhängt, hat eine gewisse Rechtfertigung durch den später geführten Nachweis erlangt, daß sich die ganze mathematische Wärmetheorie, auch ohne die Vorstellung von der mechanischen Natur der Wärme, entwickeln läßt, „wenn man sich nur an die Annahme hält, daß Wärme unter gewissen Bedingungen in Bewegung umgewandelt werden kann“ (Planck, Das Prinzip der Erhaltung der Energie, S. 27).

Anderseits ist nicht zu verkennen, daß R. Mayers Vorstellungen über Kraft und Kraftverwandlung die Auffassung aller Naturerscheinungen als Bewegungsvorgänge stark begünstigen. Wie Faraday, so betrachtet auch er die Kraft, oder wie wir zur Verhütung von Mißverständnissen lieber mit Th. Young sagen wollen, die Energie als eine Substanz. Aus der Erfahrungstatsache, daß die verschiedenen Kräfte sich ineinander verwandeln lassen, schließt er: „Es gibt in Wahrheit nur eine einzige Kraft. In ewigem Wechsel kreist dieselbe in der toten wie in der lebenden Natur.“ Die Kräfte sind ihm „wandelbare, unzerstörliche und — zum Unterschiede von den Materien — imponderable Objekte.“ Man könnte sich ja nun allerdings damit bescheiden, daß der eigentliche Träger der Umwandlungen, ihre unzerstörbare Unterlage ihrem Wesen nach unbekannt

bleiben und es dem Physiker genügen müsse, dieses Substrat als mathematische Größe darzustellen und als „quantitas vis“, als Kraftgröße zu kennzeichnen. Aber dem forschenden Geiste ist ein solcher Verzicht auf die Dauer nicht möglich. Der Mathematiker begnügt sich wohl mit dem Abstraktum, der Naturforscher muß seine Gegenstände mit sinnlichen Eigenschaften bekleiden. Bewegung und Bewegungsübertragung ist eine der alltäglichsten Erscheinungen, dem tiefer Blickenden freilich mit unlösbaren Rätseln umgeben, aber in ihrer Tatsächlichkeit doch jedermann vollkommen geläufig. Es liegt deshalb nahe, sich jeden Umsatz von Energie unter dem Bilde einer Bewegungsmitteilung vorzustellen, was natürlich nur dann möglich ist, wenn man die Wärmeerscheinungen, die elektrischen und magnetischen Vorgänge auch als Bewegungen, sei es der materiellen Körperteilchen, sei es des alles durchdringenden Äthers auffaßt. Eine eigentliche Erklärung ist mit solcher Auflösung alles Geschehens in Bewegung zwar nicht gewonnen, aber sie befriedigt das Einheitsbedürfnis menschlichen Denkens und führt viele Geheimnisse auf eins zurück.

Ob freilich die substantielle Deutung des Energiebegriffs überhaupt zulässig ist, steht auf einem andern Blatt. Die Definition der Energie als Fähigkeit einer Arbeitsleistung schließt jedenfalls eine solche Auffassung aus und zweifellos fehlt uns die Fähigkeit, eine Substanz anders als materiell vorzustellen. Doch mit solchen Erwägungen verlieren wir uns in das Gebiet der Metaphysik.

R. Mayer hat seinen Satz von der Unzerstörbarkeit der Kraft auf alle bekannten Energieformen ausgedehnt, wenn es ihm auch nicht gelang, außer dem Wärmeäquivalent noch weitere Zahlenbeziehungen aufzustellen. Eingehend behandelt er in der 2. Abhandlung die Vorgänge am Elektrophor. Der Deckel sei durch ein Gegengewicht, das mit ihm

durch einen über eine Rolle geführten Faden verbunden gedacht werden kann, ausbalanciert. Er befinde sich in der Höhe h über dem Kuchen außerhalb dessen Wirkungsbereichs und besitze das Gewicht P. Dann kommt ihm die Fallkraft (potentielle Energie) Ph zu, d. h. er vermag durch seine Senkung durch die Höhe h das Gegengewicht P um die gleiche Höhe zu heben. Ist der Kuchen elektrisch, so erfährt der Deckel eine Anziehung. Entzieht man dem auf dem negativen Kuchen liegenden Deckel die abgestoßene, freie negative Elektrizität, so wird er noch stärker angezogen. Diese Anziehung ist gleichbedeutend mit einer Vermehrung der Fallkraft des Deckels oder der Arbeitsleistung, die zu seiner Zurückführung auf die Höhe h erforderlich ist. Durch diese Zurückführung wird aber der Deckel aus dem Wirkungsbereiche des Kuchens gebracht, so daß man ihm nun die vorher gebundene positive Elektrizität entziehen kann. Der Unterschied zwischen der bei der Senkung des Deckels auf den geladenen Kuchen gewonnenen Arbeitsleistung und der größern bei seiner Hebung verbrauchten Arbeit muß gleich der Summe der beiden erhaltenen „elektrischen Effekte“ sein. „Der Schluß ist einfach. Aus Nichts wird Nichts. Die Elektrizität des Harzkuchens kann, da sie sich unvermindert erhalten hat, die fortlaufende Summe elektrischer Effekte nicht hervorgebracht haben; der bei jedem Turnus verschwundene mechanische Effekt kann nicht zu Null geworden sein. Was bleibt übrig, wenn man sich nicht in einem doppelten Paradoxon gefällt? nichts, als auszusprechen: der mechanische Effekt ist in Elektrizität verwandelt worden.“ Ähnlich wird die Reibungselektrizität durch Aufwand von mechanischer Arbeit erzeugt, während umgekehrt die Mitteilung von Elektrizität im Hervorbringen eines mechanischen Effekts unter Aufwand von elektrischer Kraft besteht.

Auch „die chemische Differenz der Materie ist eine Kraft". Die nähere Entfaltung dieses Gedankens vollzieht R. Mayer mit Hilfe einer eigenartigen Vorstellung von der Fallkraft, d. h. der durch den räumlichen Abstand einer Masse von der Erde oder einem anderen Himmelskörper in ihr aufgespeicherten Fähigkeit zur Arbeitsleistung. Bei der Ausdehnung eines Körpers wird im allgemeinen Wärme verbraucht, die bei seiner Zusammenziehung wieder zum Vorschein kommt. Das Heben und Entfernen eines Körpers vom Mittelpunkte der Erde ist gleichbedeutend mit einer Raumvergrößerung des Erdkörpers, wird diese Vergrößerung durch den Fall des Körpers rückgängig gemacht, so tritt Wärme auf. Die hier von Mayer gebrauchte Analogie ist freilich durchaus unzulässig, aber sie erweist sich doch als nützlich. Entsprechende Verhältnisse nämlich liegen bei den chemischen Elementen vor. Ihre Verbindung besteht in der Aufhebung ihrer räumlichen Trennung und das Ergebnis ist bekanntlich das Auftreten ganz erheblicher Wärmemengen.

Will man die Wärmewirkung jener „mechanischen Verbindung" eines fallenden Körpers mit der Erde und die einer chemischen Verbindung miteinander vergleichen, so hat man zu berücksichtigen, daß der chemische Vorgang erst dann beginnt, wenn ein Atom in den Anziehungsbereich eines andern tritt. Entsprechend muß man im ersten untersuchen, mit welcher Wucht oder lebendigen Kraft ein Körper auf der Erdoberfläche beim freien Falle aus einer Entfernung anlangt, in der er von der Erde nur noch eine verschwindend kleine Anziehung erfährt; es ist demnach zunächst die Endgeschwindigkeit v für eine vergleichsweise unendlich große Fallstrecke s zu ermitteln. Dieses v wird natürlich wegen der mit wachsendem Abstande von der Erdoberfläche abnehmenden Fallbeschleunigung nicht unendlich groß, vielmehr ergibt sich $v = \sqrt{2gr}$, wenn $g = 9{,}81$ m

die Beschleunigung an der Erdoberfläche und $r \sim 6370$ km der Erdradius ist, also rund $v = 11\,180$ m. Da nun, wie wir sahen, der Endgeschwindigkeit 91 m einer Kilogramm-Masse gerade 1 Kalorie entspricht, so bekommt man als Äquivalent der Geschwindigkeit 11 180 m einer Kilogramm-Masse aus der Proportion $\frac{1}{2} m v^2 : \frac{1}{2} m v_1^2 = 1 : x$ oder $91^2 : 11\,180^2 = 1 : x$ den Wert $x \sim 15\,000$ Kalorien, d. h. eine Wärmemenge, die ausreichen würde, die Temperatur von 15 Tonnen Wasser um einen 1° C zu erhöhen. Der Sturz der Masse von einem halben Gramm aus unendlicher Entfernung auf die Erde erzeugt hiernach annähernd die gleiche Wärmemenge wie die Verbrennung von nur 1 Gramm Kohlenstoff, bei der 8000 kleine Kalorien entwickelt werden! Die chemischen Kräfte zeigen sich den mechanischen Wirkungen bei kleinen Fallstrecken ganz außerordentlich überlegen. Betrachtet man aber Bewegungen durch kosmische Entfernungen hindurch, so verschwindet dieser Vorrang. Wasserstoff besitzt die größte Verbrennungswärme, die Verbindung von 1 Gramm Wasserstoff mit 8 Gramm Sauerstoff zu 9 Gramm Wasser entwickelt 34 462 kleine Kalorien, bei der Bildung von 1 Gramm Wasser ergibt sich also eine Wärmemenge von 34 462 cal : 9 = 3829 cal. Zur Entfernung der 1 Gramm-Masse aus dem Anziehungsbereich der Erde sind aber nach dem vorigen 15 000 cal erforderlich. Daraus folgt, „daß auf Erden keine chemische Differenz existiert, durch deren Aufwand so viel Wärme gewonnen würde, als zur mechanischen Trennung der neuerstandenen Verbindung von dem Erdkörper erforderlich ist." Rechnet man ferner die Masse der Erde zu 6000 Trillionen Tonnen oder zu $6 \cdot 10^{27}$ Gramm und bedenkt, daß bei der Bewegung der Erde um die Sonne jede dieser Gramm-Massen eine sekundliche Geschwindigkeit von ungefähr 30 km besitzt, so kann man mit R. Mayer

ermitteln, daß zur Erzeugung dieser Geschwindigkeit das 13fache Gewicht der Erde als Kohle verbrannt werden müßte und die dadurch entbundene Wärmemenge wiederum hinreichen würde, einer der Erde gleichen Wassermasse 110 000 Kalorien zuzuführen; „ein kleiner Teil der Kraft, mit der die Erde sich in ihrer Bahn bewegt, wäre mithin imstande, allen mechanischen Zusammenhang der irdischen Massenteile völlig aufzuheben“. Chemische Kräfte sind zur Hervorbringung solcher Wirkungen nicht fähig. Dagegen würde die Erde, wenn sie „am Anfang“ 430 Sonnenhalbmesser vom Mittelpunkte der Sonne entfernt und ruhend gewesen und von hier aus 215 Halbmesser gegen die Sonne bis in ihre nunmehrige Entfernung herabgefallen wäre, durch diesen Fall ihre jetzige Bewegungsgröße haben erlangen können. Wir erinnern uns hier an die von Galilei beiläufig erwähnte Möglichkeit der Entstehung der Planetenbewegungen. Auch bei R. Mayer ist der Gedanke nicht ernsthaft durchgeführt. Er hebt vielmehr hervor, daß an diese Hypothese immer neue geknüpft werden müßten, um den Tatsachenbestand zu erklären und schließt diese Bemerkungen, sich selbst ironisierend, mit den Worten des Dichters im „Wallenstein“:

Das eben ist der Fluch der bösen Tat,
Daß sie fortzeugend, immer Böses muß gebären.

Man muß wohl in solchen ausschweifenden Phantasien einen Ausdruck des Kraftgefühls sehen, das dem Entdecker aus der Einsicht in die tief- und weittragende Bedeutung seines Fundes zuströmt. R. Mayer hat auf astronomischem Gebiete aber auch sehr ernsthafte Folgerungen aus seiner Äquivalentzahl gezogen. Sie sind ausführlich dargestellt in der Abhandlung von 1848 „Beiträge zur Dynamik des Himmels in populärer Darstellung“. Den Ausgangspunkt

aller Rechnungen bildet die Feststellung, daß für die Geschwindigkeit c die Wärmeentwicklung 0,00012 . c^2 Kalorien beträgt; denn dem Herabfallen aus 425 m Höhe entspricht die Endgeschwindigkeit 91 m und zugleich 1 Kalorie, also der Geschwindigkeit c die Kalorienzahl $\frac{c^2}{91^2} = 0,00012\, c^2$. R. Mayer geht mit diesem „Sesam, öffne dich" vor allen Dingen an die Lösung des Problems vom Ursprung oder vielmehr von der Erhaltung der hohen Sonnentemperatur. Aus der Angabe Pouillets, daß jedes Quadratzentimeter der Erdoberfläche in der Minute 0,4408 kleine Kalorien Wärme von der Sonne empfängt, erhält er für den ganzen strahlenden Effekt der Sonne in einer Minute 12 650 Millionen Groß-Kalorien, wo eine Groß-Kalorie die Wärmemenge bedeutet, durch die eine Kubikmeile Wasser von 7420 m Kantenlänge um 1° C erwärmt wird. Chemische Vorgänge auf dem Sonnenball oder seine Reibung bei der Achsendrehung an einem umgebenden Medium reichen bei weitem nicht aus, einen solch ungeheuren Wärmeverlust zu decken. Recht wohl aber kann man sich den Ersatz durch Asteroiden beschafft denken, die beständig in die Sonne hineinstürzen. Die Geschwindigkeit eines aus vergleichsweise unendlicher Entfernung auf die Sonne treffenden Körpers ergibt sich zu 445 000—630 400 m; beim Aufprallen wird daher eine Wärmemenge erzeugt, die 4000—8000 mal so groß ist, als beim Verbrennen einer dem Asteroid gleichen Masse von Steinkohlen. 1 kg Asteroidmasse liefert also hierbei 24—48 Millionen Kalorien. Die Wärmeausgabe der Sonne wird mit ihrer Einnahme daher balancieren, wenn in jeder Minute 100 000—200 000 Billionen kg kosmische Masse auf sie niederstürzen. R. Mayer bemüht sich, diese ungeheuren Zahlen einigermaßen annehmbar zu machen, indem er daran erinnert, daß unser kleiner Erdmond mit seiner Masse

von 7.10^{23} kg den Verbrauch der Sonne 1 bis 2 Jahre lang zu decken vermöchte, die Erdmasse aber 50 bis 100 Jahre lang die nötige Nahrung für die Sonnenstrahlung abgeben könnte. Durch ein von Herschel eingeführtes Bild versinnlicht er weiter die gewaltigen Räume zwischen den Körpern unseres Planetensystems. „Als Sonne stelle man sich eine Kugel von 1 m Durchmesser vor. In einer Entfernung von 40 m befindet sich der nächste Planet, Merkur, in der Größe eines Pfefferkorns von 3½ mm Dicke. 78 und 107 m von der Sonne entfernt bewegen sich Venus und Erde, beide 9 mm dick oder etwas mehr als erbsengroß. Von der Erde nicht viel über ¼ m entfernt ist der Mond ein Senfkorn von 2½ mm Durchmesser. Mars hat in einer Entfernung von 160 m etwa den halben Durchmesser der Erde, und die kleinen Planeten Vesta, Hebe, Asträa, Juno, Pallas, Ceres usw. gleichen Senfkörnern, in einer Entfernung von 250—300 m von der Sonne. Jupiter und Saturn, in Entfernungen von 560 und 1000 m, gleichen Orangen von 10 und 9 cm Dicke. Uranus, mit einem Durchmesser von 4 cm, einer Baumnuß ähnlich, ist 2000 m und der einem Apfel von 6 cm Durchmesser vergleichbare Neptun nahe doppelt so viel oder etwa ½ geographische Meile weit von der Sonne entfernt. Von da an aber hätte man noch einen Raum von mehr als 2000 Meilen bis zum nächsten Fixstern zurückzulegen."

Denkt man sich nun diese weiten Räume mit einer fein verteilten, nach der Sonne sich hinziehenden und dort schließlich niederfallenden Materie erfüllt, so braucht man offenbar nicht zu befürchten, daß das Budget der Sonne in absehbaren Zeiten in Unordnung geraten könne.

Eine merkliche Volumenzunahme der Sonne würde durch dieses fortwährende Herabhageln kosmischer Stoffe erst in 28 500—57 000 Jahren eintreten, wäre also von uns zunächst

nicht festzustellen. Wohl aber müßte die Massenvermehrung schon in einem Jahre eine merkliche Verkürzung des siderischen Jahres zur Folge haben, weil sich die Umlaufsgeschwindigkeiten der Planeten bei gleichbleibender mittlerer Entfernung wie die Quadratwurzeln aus den Massenzahlen des Zentralkörpers verhalten. Da eine solche Längenabnahme des siderischen Jahres nicht stattfindet, bleibt nur die Annahme übrig, „daß die Sonne, dem Weltmeere ähnlich, in einem beständigen Wechsel von Zu- und Abfluß sich unverändert erhält."

Die vorstehend skizzierte Theorie R. Mayers kann auch in der Gegenwart keineswegs als veraltet hingestellt werden. Waterson und W. Thomson haben unmittelbar an sie angeknüpft. Helmholtz versuchte dagegen, unter Bezugnahme auf die Kant-Laplacesche Theorie, den Ersatz für die Wärmeausstrahlung der Sonne aus ihrer allmählichen Zusammenziehung aus einem Nebelfleck abzuleiten; es würden dann die eigenen Teile der Sonne sein, die noch immer nach ihrem Mittelpunkt hinfallen und durch die lebendige Kraft ihrer Bewegung Wärme erzeugen. Die unantastbare Grundlage aller dieser Annahmen aber bildet das mechanische Wärmeäquivalent. William Siemens hat allerdings in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts eine bemerkenswerte Hypothese aufgestellt, nach der die Deckung der Wärmeausgabe der Sonne durch chemische Vorgänge wenigstens nicht ganz von der Hand zu weisen ist. Er nimmt auf Grund von Beobachtungen über den Gasgehalt von Meteoriten und die Zusammensetzung der Kometen, sowie sonstiger physikalischer Tatsachen an, daß der Raum unseres Sonnensystems außerhalb der Planetenatmosphären von Gasen, hauptsächlich brennbaren, wie Wasserstoffgas, erfüllt sei. Durch ihre mächtige Zentrifugalkraft am Äquator schleudert die Sonne fortwährend verbrannte Gasmassen

in den Raum hinaus, als Ersatz strömen an den Polen unverbrannte Gasmassen herzu und liefern durch ihre Verbindung mit Sauerstoff oder anderen Stoffen auf der Sonne Wärme. Die abgeschleuderten Gase werden nach der Meinung von Siemens durch die Sonnenstrahlen selbst wieder reduziert und dadurch zu erneuter Verbrennung befähigt. Auf diese Weise wird die Sonne die scheinbar nutzlos in den Raum ausgestrahlte Energie voll zurückerhalten können und nur die geringe von den Planeten absorbierte Wärmemenge, d. h. nur den 2000 millionsten Teil ihrer gesamten Energie verlieren.

Eine andere wichtige Frage, deren Lösung R. Mayer in Angriff nahm, betrifft den Einfluß von Ebbe und Flut auf die tägliche Erdrotation. Es scheint einleuchtend, daß die von West nach Ost gerichtete Drehung der Erde durch die entgegengesetzt verlaufende Gezeitenströmung verzögert werden muß, und doch ist eine solche Verzögerung nicht festzustellen. R. Mayer erinnert aber daran, daß eine auf Grund anderer Tatsachen zu erwartende Vermehrung der Rotationsgeschwindigkeit der Erde ebensowenig beobachtet werden konnte. Zahlreiche Erscheinungen deuten auf einen ehemaligen feurig-flüssigen Zustand der Erdmasse hin; ihre allmähliche Abkühlung von der Oberfläche aus muß mit einer Volumenverminderung und diese mit einer Zunahme der Umdrehungsgeschwindigkeit, die an einer Verkürzung der Tageslänge erkennbar ist, verbunden sein.

Laplace hat jedoch gefunden, daß im Laufe von 25 Jahrhunderten die Umdrehungszeit der Erde sich nicht um den fünfhundertsten Teil einer Sexagesimalsekunde verändert hat. Wollte man aber hieraus auf eine nur unmerkliche Zusammenziehung des Erdkörpers in diesem langen Zeitraume schließen, so würde die Erklärung der vulkanischen Erscheinungen erhebliche Schwierigkeiten darbieten. Auch

eine annähernde Schätzung des Wärmeverlustes der Erde in 2500 Jahren widerspricht einer solchen Annahme. Die Lösung des Rätsels ergibt sich, wenn man in Anschlag bringt, daß der aus der Abkühlung der Erde resultierenden Rotationsbeschleunigung durch die gerade entgegengesetzte Wirkung der Gezeiten sehr wohl, wenigstens eine Zeitlang, die Wage gehalten werden kann. In den frühesten Zeiten der Abkühlung mußte allerdings eine Zunahme der Umdrehungsgeschwindigkeit eintreten. Da jedoch die Abkühlung nach Bildung der festen Erdrinde immer langsamer vor sich geht, muß allmählich der Druck der Gezeiten immer mehr zur Geltung kommen und eine Verminderung der Umdrehungsgeschwindigkeit bewirken. „Zwischen der Zunahme und der Abnahme liegt aber eine Periode des Stillstandes oder des Gleichgewichtes der entgegengesetzten Einwirkungen." Während in den Beiträgen zur Dynamik des Himmels R. Mayer noch glaubte, daß wir in der mittleren dieser Perioden leben, schloß er in einem 22 Jahre später gehaltenen Vortrage „Über Erdbeben" aus einer 1860 von Adams angestellten Berechnung, der zufolge der Sterntag in einem Jahrtausend um $^1/_{100}$ Sekunde wächst, daß wir uns zu Anfang der dritten Periode befinden, in welcher der verzögernde Einfluß der Ebbe und Flut beginnt, über den beschleunigenden Einfluß der Abkühlung das Übergewicht zu bekommen.

Für R. Mayer als Arzt lag es nahe, der Äquivalenz zwischen Wärme und Arbeit auch in der belebten Natur näher nachzugehen, deren aufmerksame Betrachtung sein Nachdenken ja zuerst in diese Richtung gelenkt hatte; die umfangreichste seiner Schriften „Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel" ist zu einem großen Teile dieser Untersuchung gewidmet. Dabei leitet ihn die Überzeugung, „daß während des Lebensprozesses

nur eine Umwandlung, so wie der Materie, so der Kraft, niemals aber eine Erschaffung der einen oder der anderen vor sich gehe". Wer die organischen Erscheinungen auf eine besondere Lebenskraft zurückführt, schneidet jede weitere Forschung ab und macht die Anwendung der Gesetze exakter Wissenschaften auf die Lebensvorgänge unmöglich. — Durch Reduktion der Kohlensäure der atmosphärischen Luft erzeugen die Pflanzen eine chemische Differenz, also Energie. Sie vermögen diese Tätigkeit nur im Sonnenlichte auszuführen. Die Aufnahme von Sonnenlicht ist der zur Leistung jener Reduktion erforderliche Aufwand. Die Pflanzen fangen die flüchtigen Sonnenstrahlen ein, fixieren sie und speichern ihre Kraft zu künftigem Gebrauche auf.

Die Verwandlung chemischer Differenz in individuell nutzbaren mechanischen Effekt ist das charakteristische Merkmal des Tierlebens. Fortwährend eignet sich das Tier durch Raub den von den Pflanzen aufgespeicherten Vorrat an und verbindet die aufgenommenen brennbaren Stoffe wieder mit dem Sauerstoff der Luft. Die dabei auftretende Verbindungswärme erfüllt einen doppelten Zweck; sie erhält die Temperatur des Körpers trotz beständiger Wärmeabgabe an die Umgebung auf annähernd gleichbleibender Höhe und sie liefert das Mittel zu mechanischen Leistungen. R. Mayer rechnet zunächst die Menge Kohlenstoff aus, durch deren Oxydation eine Pferdekraft hergegeben wird. Legen wir die jetzt angenommenen Zahlen zugrunde, so ergibt sich folgendes: Eine Pferdekraft vermag in einer Sekunde 75 kg einen Meter hoch zu heben, also in einer Minute 4500 kg, in einer Stunde 270 000 kg und in einem achtstündigen Arbeitstag 2 160 000 kg. Durch die Verbrennung von 1 kg Kohlenstoff werden 8000 Kalorien gewonnen und da 1 Kalorie 427 Meterkilogrammen äquivalent ist, sind 8000 Kalorien gleichwertig mit 3 416 000 Meter-

kilogrammen. Das Pferd muß daher an einem Arbeitstag nur zur Aufbringung seiner Arbeitsleistung so viel mal 1 Kilogramm Kohle verbrennen, als 3416000 in 2160000 enthalten ist, also 632 g, in 1 Arbeitsstunde 79 g, in 1 Minute 1,3 g, in 1 Sekunde 0,02 g. Schätzt man die Leistungen eines starken Arbeiters auf $^1/_7$ Pferdekraft, so vermag er in einem Arbeitstage rund 310 000 kg 1 m hoch zu schaffen und muß dazu 90 g Kohlenstoff verwenden. Ein Mann von 72 kg Gewicht verbraucht beim Besteigen eines 3000 m hohen Berges, den bei jedem Tritte durch unelastischen Stoß verloren gehenden mechanischen Effekt ungerechnet, für seine Arbeitsleistung von 216 000 Meterkilogrammen 63 g Kohlenstoff.

Die beständige Wärmeerzeugung im Tierkörper erfordert aber einen weiteren Kohlenstoffverbrauch. Dabei ist noch besonders in Betracht zu ziehen, daß der tätige Organismus mehr freie Wärme bildet, als der ruhende, „da schon die verstärkte Respiration einen verstärkten Wärmeverlust bedingt, der durch eine vermehrte Erzeugung gedeckt werden muß“. Starke Tätigkeit erhöht die Erzeugung freier Wärme und setzt dadurch den für mechanische Arbeitsleistungen verfügbaren Energievorrat herab; es besteht zwischen beiden Produktionen ein gewisser Widerstreit, den nur ein „Eile mit Weile“ einigermaßen schlichten kann. Die Ruhe und Gemessenheit, mit der Handarbeiter ihre Arbeit zu verrichten pflegen, erscheint hiernach als physiologisch durchaus notwendig; wer solcher Tätigkeit ungewohnt ist, sieht seine Kraft nach kurzem, hastigem Anlauf schnell erschöpft. Der arbeitende Organismus braucht also aus doppeltem Grunde mehr Nahrungsstoff als der ruhende, einmal zur Erzeugung der mechanischen Leistungen und zweitens wegen der größeren Wärmeproduktion. R. Mayer weist nach, daß jedenfalls der Mehraufwand an verzehrten Nahrungsmitteln bei

tätigen Individuen vollkommen ausreicht, um die Hervorbringung aller mechanischen Wirkungen durchaus natürlich, ohne das Heranziehen einer Lebenskraft, zu erklären. Zugleich ergibt sich, daß der für diese Wirkungen aufgewendete Kohlenstoff nur ungefähr $^1/_5$ des Gesamtaufwandes von Kohlenstoff beträgt und die übrigen $^4/_5$ lediglich zur Wärmebildung verbraucht werden. Die Gefangenen im Arresthause zu Gießen, denen jede Bewegung mangelte, erhielten damals täglich 266 g Kohlenstoff. Rechnet man, daß 4 % des eingeführten Kohlenstoffes unverbrannt wieder ausgeschieden werden, so bleiben 255 g für die Verbrennung übrig. Ein kasernierter Soldat genoß täglich 453 g Kohlenstoff und bei angestrengtem Dienst 563 g, behielt also bei 4 % ungenutzter Ausscheidungen 540 g zur Verbrennung. Davon kommen nach dem früher behandelten Beispiel auf mechanische Arbeitsleistung 90 g. Also verhält sich der mechanische Effekt zum Gesamtverbrauche wie 90 : 540 = 0,17. Weiter hat der Soldat 285 g mehr verbraucht als der untätige Gefangene; die mechanische Leistung verhält sich zu diesem Mehrverbrauch wie 90 : 285 = 0,3. Endlich steht die Wärmeentwickung in der Ruhe zu der in der Arbeit im Verhältnis von 255 : 540 — 90 = 0,5, ist also in jenem Falle nur halb so groß als in diesem. Selbstverständlich sollen diese Beispiele nur ein ganz allgemein gehaltenes Schema der Vorgänge geben, da sonst die beträchtliche, vom verbrannten Wasserstoff gelieferte Wärme auch noch zu berücksichtigen wäre. Zur Begründung der oben aufgestellten Sätze reichen sie indessen aus.

An die Untersuchung der Abhängigkeit der mechanischen Arbeitsleistung des Organismus von seiner Nahrungsaufnahme knüpft R. Mayer weiter den Nachweis, daß der Muskel nur das Werkzeug zu diesem Kraftumsatz ist, eine Art Hebel, nicht der zur Hervorbringung der Leistung um-

esetzte Stoff. Setzt man z. B. die von der linken Herzkammer bei jeder Zusammenziehung geförderte Blutmenge zu 150 cbcm und den hydrostatischen Druck des Blutes in den Arterien gleich dem Druck einer Quecksilbersäule von 16 cm Höhe, also 16 . 13,6 g auf den Quadratzentimeter Grundfläche, so hebt die linke Herzkammer bei jeder Zusammenziehung ein Gewicht von 217 g 150 cm hoch, die mechanische Arbeitsleistung beträgt daher 325,6 g auf 1 m. Da eine kleine Kalorie äquivalent mit der Hebung von 427 g auf 1 m ist, entsprechen jener Arbeitsleistung 0,762 kleine Kalorien, d. h. das Ergebnis der Verbrennung von 0,095mmg Kohlenstoff. Erfolgen in einer Minute 70, an einem Tage also 100 800 Pulsschläge, so ist der mechanische Effekt der linken Herzkammer an einem Tage rund 32 820 kgmtr oder 76 863 kleine Kalorien, was der Verbrennungswärme von etwa 9,6 g Kohlenstoff entspricht. Nimmt man an, daß die Leistung der rechten Herzkammer etwa die Hälfte von der linken ist, so ist der mechanische Effekt beider Kammern an einem Tage 49 230 kgmtr oder 115 295 kleine Kalorien oder gleich der Verbrennungswärme von 14,4 g Kohlenstoff. „Das Gewicht des ganzen Herzens zu 500 g angenommen, und hiervon 77 % Wasser abgezogen, bleiben 115 g trockene brennbare Materie.“ Wäre diese reiner Kohlenstoff, so müßte das ganze Herz, wenn es den Stoff zu seiner Leistung selbst abgeben sollte, in etwa 8 Tagen oxydiert sein und die beiden Herzkammern allein, die nur 202 g wiegen, gar schon in der Hälfte dieser Zeit. Da eine so rasche Verbrennung und Neubildung der normal tätigen Muskelfasern mit physiologischen Tatsachen und mikroskopischen Forschungen in offenbarem Widerspruche steht, kann also ein erheblicher Teil des zur Leistung verbrauchten Brennstoffes von der Muskelfaser selbst nicht herrühren. Der ganze Oxydationsprozeß erfolgt vielmehr wesentlich innerhalb der Gefäßwandungen im Blut.

Bei schweren Erkrankungen kann der mechanische Nutzeffekt des chemischen Aufwandes auf den Wert Null sinken; der ganze chemische Effekt wird im Fieber zur Wärmebildung verwendet („Über das Fieber", 1862). Die Anpassung an die sich nach den äußeren Verhältnissen richtenden Bedürfnisse des Organismus ist im Fieber wesentlich gestört. Wir sehen, daß R. Mayer, der in seinem Vortrage auf der allgemeinen Versammlung der Naturforscher zu Innsbruck 1869 „Über notwendige Konsequenzen und Inkonsequenzen der Wärmemechanik" erklärte: „In der Physik ist die Zahl alles, in der Physiologie ist sie wenig, in der Metaphysik ist sie nichts," doch an seinem Teile dazu beigetragen hat, mit Hilfe seines Äquivalenzprinzips den zweiten Teil dieses Satzes erheblich einzuschränken.

Von dem öden Materialismus eines Vogt aber wollte er nichts wissen. Es gibt nicht nur Materie und Kraft, sondern auch Geist. Die materiellen Vorgänge im Gehirn gehen wohl der geistigen Tätigkeit parallel, sind aber nicht mit ihr identisch, so wenig wie sich der Inhalt einer Depesche als Funktion der elektrochemischen Wirkung betrachten läßt. Der Geist ist kein Gegenstand der Untersuchung für den Physiker und Anatomen; hier ist die Zahl in der Tat nichts.

Die sichere Überzeugung vom Bestehen einer zahlenmäßig ausdrückbaren Äquivalenz zwischen Wärme und Arbeit hatte R. Mayer aus dem Prinzip der Gleichheit von Ursache und Wirkung, aus dem Satze „causa aequat effectum" geschöpft. Aber der schwächste Funke, der in ein Pulverfaß fällt, ruft eine zerschmetternde Explosion hervor, der Flügelschlag eines Vogels vermag eine Wälder und Häuser niederreißende Lawine in Bewegung zu setzen. Widersprechen diese unter dem Namen der „Auslösung" bekannten Vorgänge nicht jenem Satz? Schon Kant hat bemerkt, daß in solchen Fällen nur schlummernde Kräfte geweckt, nicht aber

hervorgebracht werden (nova dilucidatio, Ausgabe von Hartenstein Bd. 1, S. 391). „So liegt derjenige Donner, den die Kunst zum Verderben erfand, in dem Zeughause eines Fürsten aufbehalten zu einem künftigen Kriege in drohender Stille, bis, wenn ein verräterischer Zunder ihn berührt, er im Blitze auffährt und um sich her alles verwüstet. Die Spannfedern, die unaufhörlich bereit waren, aufzuspringen, lagen in ihm durch mächtige Anziehung gebunden und erwarteten den Reiz eines Feuerfunkens, um sich zu befreien" (Kant, „Versuch, den Begriff der negativen Größen in die Weltweisheit einzuführen", S. 101). Auch R. Mayer ist in seiner letzten Veröffentlichung von 1876 „Über Auslösung" der Frage näher getreten. Er erwähnt die mechanische Verbindung von Knallgas, die Einleitung beliebig großer Verbrennungsprozesse durch ein brennendes Streichholz, die Gärungsvorgänge, das Hervorbringen willkürlicher Bewegungen. „Der Mensch ist seiner Natur nach so beschaffen, daß er gerne mit Aufwendung geringer Mittel möglichst große Erfolge erzielt", wie die Freude am Abfeuern von Schußwaffen, dem Rosselenken beim Reiten und Fahren usw., aber auch Attentate auf Menschen und Eisenbahnzüge und Brandstiftungen beweisen. Immer ist hier die sogenannte Ursache nur der „Anstoß" oder die „Veranlassung" zum „Erfolg", und es besteht zwischen Veranlassung und Erfolg überhaupt keine quantitative Beziehung. Wenn R. Mayer behauptet, die Auslösung sei kein Gegenstand mehr für die Mathematik, so kennzeichnet er damit ganz treffend die Tatsache, „daß auslösende und ausgelöste Kraft voneinander unabhängig, durch kein Gesetz verknüpft sind," wenn auch selbstverständlich jede auslösende Kraft einen ganz bestimmten Mindestwert besitzen muß, um überhaupt die Auslösung herbeiführen zu können (vgl. E. Du Bois-Reymond, „Die sieben Welträtsel", 1884, S. 100—101).

R. Mayers erste Schrift vom Jahre 1842 hat ihm zwar in der Geschichte der Wissenschaft die Priorität der Entdeckung des mechanischen Wärmeäquivalents gesichert, aber zunächst gar keine Beachtung gefunden. Für E. Dühring, einen scharfsinnigen und geistreichen, aber völlig verbitterten Gelehrten, ist das vielleicht eine nicht unwillkommene Veranlassung gewesen, die ganze Schale seines Zornes über die deutschen Universitätsprofessoren auszugießen. Seine Schrift „Robert Mayer, der Galilei des 19. Jahrhunderts" strotzt von den gröbsten Anklagen und Schmähungen gegen die bedeutendsten Physiker Deutschlands und Englands derart, daß ihre Lektüre geradezu physisches Unbehagen erregt. Mit Recht wird sie in F. Rosenbergers Geschichte der Physik als ein unwissenschaftliches Pamphlet gekennzeichnet. Die Mayersche Berechnung war für die Physik seiner Zeit etwas vollkommen Neues, ihre Darstellung in der ersten Abhandlung aber nur skizzenhaft und außerdem mit metaphysischen Erörterungen verbunden, die infolge von Schellings und Hegels naturphilosophischen Seiltänzerkünsten in größtem Mißkredit standen. Auch ist die erste Mayersche Abhandlung insofern unglücklich disponiert, als ihr wichtigstes Ergebnis erst ganz am Schlusse in Form „einer praktischen Folgerung" aus den vorangestellten allgemeinen Thesen zum Vorschein kommt, also an einer Stelle, bis zu der die meisten Leser wahrscheinlich gar nicht vorgedrungen sind, weil ihnen der Eingang kein besonderes Interesse abzugewinnen vermochte. Ihr Titel verrät ebenfalls nichts vom wesentlichen Inhalt. Man mag daraus die Lehre ziehen, daß es notwendig ist, sofort die Aufmerksamkeit auf das Neue zu lenken, das man mitzuteilen gedenkt, weil andernfalls ein Aufsatz bei der Hochflut von Veröffentlichungen, von denen die Vertreter der Wissenschaft ständig Kenntnis zu nehmen haben, Gefahr läuft, als der Beachtung unwert beiseite geschoben zu werden.

Die ausführlichen Abhandlungen R. Mayers von 1845, 1848 und 1850 waren von den Mängeln der ersten frei. Die deduktive Begründung blieb zwar bestehen, aber eine Fülle von Folgerungen aus dem Äquivalenzsatze, die sich an der Erfahrung prüfen ließen, wußte die vorgesetzte Kost selbst den eifrigsten Anhängern der induktiven Methode schmackhaft zu machen. Leider aber kamen diese Schriften zu spät, um sofort die verdiente Würdigung zu finden. Denn mit dem 24. Januar 1843 begann die Bekanntgabe der klassischen experimentellen Bestimmungen des mechanischen Wärmeäquivalents durch Joule, der durch Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen den thermischen und chemischen Wirkungen des galvanischen Stromes zu ähnlichen Ideen wie R. Mayer gelangt war. Zwar blieben auch seine ersten Arbeiten zunächst ziemlich unbeachtet, aber allmählich errang seine Ausdauer und seine Geschicklichkeit, die aus immer neuen Versuchsanordnungen stets annähernd das gleiche Ergebnis erhielt, den Sieg über die Gleichgültigkeit der Fachgenossen, zumal da auch der dänische Ingenieur Kolding und C. Holtzmann mit ähnlichen Resultaten vor die Öffentlichkeit traten. 1845 verwirklichte Joule das Gedankenexperiment R. Mayers, indem „er die bei der Kompression von Luft aufgewendete mechanische Arbeit mit der dabei eintretenden Temperaturerhöhung" verglich. Daß eine bloße Volumenänderung der Luft ohne äußere Arbeitsleistung keine Temperaturänderung an ihr zu bewirken vermag, zeigte er ergänzend durch einen besonderen Versuch, bei dem bis zu 22 Atmosphären komprimierte Luft in einen luftleeren Raum strömte; nach Eintritt des Gleichgewichts war keine Temperaturabnahme festzustellen. „Ließ er dagegen verdichtete Luft in die freie Atmosphäre ausströmen, so ergab sich eine Temperaturabnahme, proportional der durch die Überwindung des Widerstandes geleisteten Arbeit"

(nach M. Planck, dessen Angabe, R. Mayer habe „stillschweigend angenommen, daß bei Volumenänderungen der Luft keine innere Arbeit geleistet wird“, aber unzutreffend ist, da R. Mayer in der Schrift „Die organische Bewegung“ S. 26 ausdrücklich auf Gay-Lussacs, jene Tatsache feststellendes, Experiment hinweist). Es ist jedenfalls begreiflich, daß für die, aller Naturphilosophie feindlich gegenüberstehenden, Physiker der damaligen Zeit die Arbeiten R. Mayers durch die experimentellen Forschungen Joules völlig in den Schatten gestellt, ja geradezu verdeckt wurden.

Immerhin bleibt es ein merkwürdiger Umstand, daß erst ein Engländer, J. Tyndall, R. Mayers Verdienste zur Anerkennung brachte. In dem Buche „Die Wärme, betrachtet als eine Art der Bewegung“ (1867) hat er in treffenden Worten die Bedeutung R. Mayers und Joules für die neue physikalische Erkenntnis abgewogen und charakterisiert: „Mayers Arbeiten tragen gewissermaßen den Stempel einer tiefsinnigen Anschauung, welche jedoch in des Verfassers Geist die Kraft unzweifelhafter Überzeugung gewonnen hatte. Joules Arbeiten sind im Gegenteil experimentelle Beweise. Mayer vollendete seine Theorie geistig und führte sie zu ihrer großartigsten Anwendung. Joule arbeitete sich seine Theorie heraus und gab ihr die Sicherheit einer Naturwahrheit. Treu dem spekulativen Instinkt seines Landes zog Mayer große und wichtige Schlüsse aus seinen Vordersätzen, während der Engländer vor allem darauf bedacht war, Tatsachen unwiderruflich festzustellen. Der künftige Historiograph der Wissenschaft wird, denke ich, diese Männer nicht als Widersacher hinstellen.“



Hermann von Helmholtz

7. Helmholtz.

„Wer aus Lust an der Sache arbeitet und demzufolge strebt, die Sache zu fördern, der wird durch die Arbeit veredelt, welche es auch sein mag.“ Helmholtz.

Die Entdeckung des mechanischen Wärmeäquivalents durch R. Mayer läßt sich mit dem Erreichen eines unbekannten Erdteils vergleichen. Das Aufsuchen möglichst zahlreicher Wege dahin entspricht den Experimenten Joules, die den wichtigen Nachweis lieferten, daß immer die gleiche Äquivalentzahl gefunden wird, wie auch mechanische Arbeit in Wärme verwandelt werden mag. Ein genialer Gedankenblitz erhellte dem ersten Entdecker die dunkle Ferne und zeigte ihm die Bahn durch die Weite unbekannter Ozeane zu dem innerlich erschauten Ziele. Umsicht, Ausdauer und reiche Mittel ermöglichten dem zweiten die Herstellung gesicherter Verbindungen zwischen dem neuen Lande und der alten Kulturwelt. Aber noch fehlte die klare und scharfe kartographische Umgrenzung, die gründliche topographische Aufnahme des gewonnenen Gebietes, durch die erst die volle Bedeutung des Zuwachses für jedermann ins Licht zu setzen war. Das vermochte nur ein mit gründlichen und tiefen Kenntnissen ausgerüsteter Fachmann von weitem, umfassendem Blick und geschärftem, sicherem Urteil zu leisten. In solchem Sinne gebührt das Verdienst, das Gesetz von der Erhaltung der Energie zum unverlierbaren Besitz der Wissenschaft erhoben zu haben, unserem großen deutschen Naturforscher Hermann Helmholtz (geb. am 31. August 1821 in Potsdam, gest. am 8. September 1894 in Charlottenburg).

Helmholtz besaß ein Wissen von seltenem und geradezu erstaunlichem Umfang. Unter dem Zwange äußerer Verhältnisse mußte er zunächst den praktischen ärztlichen Beruf ergreifen. Aber von vornherein fesselten ihn vorzugsweise die Hilfswissenschaften der Medizin, die einer wirklich exakten Behandlung zugänglich erschienen, Physiologie, Anatomie, Chemie, Physik; die Art, wie sich experimentelle und theoretische Physik zur Lösung der physikalischen Probleme verbinden, war ihm das ideale Vorbild für die Methode der Naturwissenschaft überhaupt. Die Physik selbst wurde immer mehr seine Lieblingswissenschaft. Nirgends fand er ein Genügen darin, sich nur die bereits vorhandenen Kenntnisse zu eigen zu machen; überall wurden ihm diese züs prudelnden Quellen eigener neuer Erkenntnisse. Das von der Vor- und Mitwelt überkommene geistige Besitztum erwarb er in rastloser, nie ermüdender Arbeit, die ihm, dank seiner hervorragenden Begabung, sich die verborgensten und verwickeltsten Beziehungen mit sinnlicher Klarheit vorzustellen, dank auch seiner großen experimentellen Geschicklichkeit hundertfältige Frucht trug. Eine gründliche Beherrschung der Mathematik gewährte ihm die Möglichkeit, die in Angriff genommenen Aufgaben und den Weg ihrer Lösung mit größter Schärfe zu formulieren und darzustellen. Sie war ihm vor allen Dingen auch das willkommene Werkzeug, mit dessen Hilfe er in systematischer Weise die Mannigfaltigkeit der ewig wechselnden Erscheinungen auf bleibende Gesetze zurückzuführen, in ihrer Flucht den ruhenden Pol zu entdecken wußte. Die Überzeugung aber von der Möglichkeit solcher Entdeckung gewann er aus einer tiefen philosophischen Bildung, deren Keime im Vaterhaus gelegt worden waren, und zugleich aus einer von der frühesten Jugend bis ins späte Greisenalter festgehaltenen warmen Liebe zur Kunst, die in ihren höchsten Formen stets auf die Schöpfung eines

in sich geschlossenen und aus sich selbst verständlichen Ganzen ausgeht.

Aus dieser philosophisch-künstlerischen Anschauung heraus mag Helmholtz den ersten Antrieb zu der Gedankenentwicklung erhalten haben, deren Ergebnisse er der wissenschaftlichen Welt in der berühmten Abhandlung von 1847 „Über die Erhaltung der Kraft" vorlegte mit einer Einleitung, die sein Freund du Bois-Reymond enthusiastisch als „ein wissenschaftliches Dokument großer wissenschaftlicher Konzeption für alle Zeiten" bezeichnete. Bei der Ausführung erkannte er die Möglichkeit der Begründung des Gesetzes von zwei scheinbar verschiedenen Ausgangspunkten her, deren Gleichberechtigung durch das Aufzeigen ihrer Einerleiheit zu erweisen war. Den einen bildet die Annahme der Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile zweiter Art, d. h. einer Vorrichtung, die sich dauernd selbst gegenüber allen Bewegungshindernissen in Bewegung erhalten und dabei auch noch nach außen nutzbare Arbeit abgeben könnte. Helmholtz erzählt in einem populär-wissenschaftlichen Vortrag „Über die Wechselwirkung der Naturkräfte" (1854), wie noch vor wenigen Jahren ein spekulativer Amerikaner die industrielle Welt Europas durch Bekanntgabe einer angeblichen Erfindung dieser Art in Aufregung versetzt habe. Durch schnelle Umdrehung des Magneten einer magnetelektrischen Maschine wollte er kräftige elektrische Ströme gewinnen, durch diese Wasser zersetzen, den erhaltenen Wasserstoff und Sauerstoff zum Betrieb eines Knallgasgebläses, dieses zur Erzeugung von Drummondschen Kalklicht benutzen; er behauptete, bei der Verbrennung der beiden Gasarten hinreichende Wärme erhalten zu haben, um eine kleine Dampfmaschine damit zu heizen, welche ihm wiederum seine magnetelektrische Maschine treibe, das Wasser zersetze und sich so ihr eigenes Brennmaterial fortdauernd selbst bereite. Helmholtz

fügt humorvoll hinzu: „Dies wäre allerdings die herrlichste Erfindung von der Welt gewesen, ein Perpetuum mobile, welches neben der Triebkraft auch noch sonnenähnliches Licht erzeugte und die Zimmer erwärmte." — Da die Unmöglichkeit, auf rein mechanischem Wege, durch bloß bewegende Kräfte, Arbeit ohne einen genau entsprechenden Arbeitsaufwand zu gewinnen, bereits mittelst unanfechtbarer mathematischer Schlußfolgerungen festgestellt war, und es hiernach höchst unwahrscheinlich schien, daß die Einschiebung anderer Naturkräfte wie Wärme, Licht, Elektrizität, Magnetismus oder chemischer Verwandtschaftskräfte in irgendeinen Prozeß ein abweichendes Ergebnis liefern könne, lag es nahe, an die Stelle aussichtsloser Kombinationen zur Konstruktion eines Perpetuum mobile die neue Einsichten versprechende Frage zu stellen: „Wenn ein Perpetuum mobile unmöglich sein soll, welche Beziehungen müssen dann zwischen den Naturkräften bestehen, und bestehen diese Beziehungen tatsächlich?" — Dies war der eine Weg, auf dem Helmholtz vorging, ohne etwas von den Veröffentlichungen R. Mayers und Koldings zu wissen, während er mit Joules Versuchen wenigstens gegen das Ende seiner Arbeit bekannt wurde. Er zeigte, daß der Satz von der Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile in mathematischer Formulierung das Prinzip der lebendigen Kraft ist. „Dies Prinzip in Verbindung mit der Annahme, daß alle Kräfte sich auflösen lassen in solche, die nur von Punkt zu Punkt wirken, führt dann mit Hilfe der Newtonschen Axiome zu der Folgerung, daß die Elementarkräfte Zentralkräfte sind, d. h. anziehend oder abstoßend wirken mit einer Intensität, die nur von der Entfernung abhängt." Überall also, wo sich die Naturerscheinungen auf solche Kräfte zurückführen lassen, gilt das Gesetz von der Erhaltung der Kraft.

Man kann aber auch umgekehrt das Prinzip von der Erhaltung der lebendigen Kraft aus der Annahme herleiten, daß die Elementarkräfte Zentralkräfte sind. Helmholtz sucht die Zulässigkeit dieser Voraussetzung folgendermaßen zu begründen. Die Beschaffenheit unseres Erkenntnisvermögens zwingt uns, jeden Vorgang als Wirkung einer Ursache aufzufassen. Legen wir unserer Forschung die Überzeugung von der Begreiflichkeit der Natur zugrunde, so müssen wir an der Möglichkeit festhalten, zu letzten Ursachen zu gelangen, die unveränderlich und beharrend und insofern einer naturwissenschaftlichen Erklärung weder bedürftig noch zugänglich sind. Die Beharrlichkeit in diesem Sinne kommt zunächst der Materie zu. An sich ist sie wirkungs- und eigenschaftslos, Eigenschaften und Wirkungsfähigkeit erhält sie erst durch ihre in den Naturgesetzen sich entfaltenden Kräfte. Es muß also auch zeitlich unveränderliche Grundkräfte geben. Die chemischen Elemente mit ihren konstanten Qualitäten sind ihre Träger. Für sie bleibt nur noch die Möglichkeit einer einzigen Art der Veränderung bestehen, die räumliche der Bewegung. Die Aufgabe der Naturwissenschaft ist daher die Zurückführung der Naturerscheinungen auf Bewegungen von Materien mit unveränderlichen Bewegungskräften, die nur von den räumlichen Verhältnissen abhängig sind. Änderung der räumlichen Verhältnisse ist aber nur zwischen mindestens zwei Körpern möglich, Bewegungskraft läßt sich erklären als Ursache der gegenseitigen Lagenänderung von zwei Körpern. Geht man nun, wie üblich, bei der Beschreibung der Erscheinungen auf die Betrachtung von Punkten des von Materie erfüllten Raumes, also von sogenannten materiellen Punkten, zurück, so reduziert sich schließlich die Frage auf die nach den Bestimmungsstücken der Lage von zwei Punkten zueinander. Diese ist durch Richtung und Größe ihrer geraden Verbindungslinie ge-

geben. Die Kräfte, die zwei materielle Punkte aufeinander ausüben, werden daher in der Richtung dieser Linie wirken und in ihrer Größe durch den Abstand der Punkte bestimmt sein müssen, das heißt aber, alle Naturerscheinungen sind auf Zentralkräfte der oben gekennzeichneten Art zurückzuführen. Aus dieser Annahme läßt sich dann mit Hilfe der Newtonschen Axiome das Prinzip der lebendigen Kraft herleiten. Es ist daher in der Tat einerlei, ob man beim Beweise des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft von der Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile oder von der Zurückführung der Naturvorgänge auf Zentralkräfte ausgeht.

Beide Betrachtungsweisen bringen eine durchaus kinetische Auffassung alles physikalischen Geschehens zur Geltung. Das beständige Anwachsen der Erfahrungen, aus denen die Unhaltbarkeit der Lehre von den Imponderabilien unwiderleglich folgte, die gehäuften Entdeckungen über die Wechselwirkung aller Naturkräfte und das Bedürfnis nach einer einheitlichen Grundlage der Darstellung drängten fast unwiderstehlich dazu, die ganze Physik in Mechanik zu verwandeln. Als metaphysische Forderung war eine solche Auffassung des Geschehens ja uralt und bereits von Demokrit (geb. um 460 v. Chr.) mit voller Klarheit aufgestellt. Aber diese Idee zerflatterte, eine schaumgeborene Göttin, in den Lüften. Sie aus festem, irdischen Stoff aufs neue dauernd zu bilden, ihr Lebenskraft und Lebensodem einzuhauchen, und sie zu einer zuverlässigen Führerin der Naturwissenschaft zu erheben, gelang erst der beharrlichen Arbeit von mehr als zwei Jahrtausenden, und selbst ihre Ergebnisse können noch keineswegs als unanfechtbare Bestätigung der Richtigkeit des Gedankens von Demokrit gelten. Zwar ist für die meisten Naturkräfte festgestellt, daß zur Verbreitung ihrer Wirkung von Körper zu Körper Zeit gehört, aber für die Gravitation ist

selbst dieser Nachweis, der für jede Ausbreitung einer Bewegung unbedingt geführt werden können muß, noch nicht erbracht. Noch viel mehr aber fehlt daran, daß an den Körpern selbst alle Kraftäußerungen mit Sicherheit als Bewegungsvorgänge erfaßt sind, bei den Erscheinungen von Wärme, Licht, Elektrizität und Magnetismus ist man in dieser Hinsicht bis zum heutigen Tage über mehr oder minder wahrscheinliche Hypothesen nicht hinausgekommen. Es ist höchst merkwürdig, daß das von Helmholtz auf Grund einer rein mechanischen Auffassung alles Naturgeschehens zur Geltung und allgemeinen Anerkennung gebrachte Gesetz von der Erhaltung der Energie in der weiteren Entwicklung der Physik wiederholt dazu benutzt worden ist, jenen Schwierigkeiten aus dem Wege zu gehen, indem man sich damit begnügte, bei allen Vorgängen die Gültigkeit des Erhaltungsgesetzes aufzuzeigen, auf eine nähere Beschreibung der Art seiner Betätigung aber verzichtete. Helmholtz, der im übrigen eine möglichst hypothesenfreie Beschreibung der Wirklichkeit in ähnlicher Weise wie G. Kirchhoff anstrebte, konnte an eine solche Verwendung des Energiegesetzes als Palliativ nicht denken, weil ihm die Zurückführbarkeit aller Erscheinungen auf Bewegungsvorgänge grundsätzlich feststand, mindestens als eine der bestbegründeten Hypothesen erschien. Vielmehr ergab es sich ihm gerade erst aus der kinetischen Auffassung als Verallgemeinerung des Satzes von der Erhaltung der lebendigen Kraft. Umgekehrt läßt sich keineswegs aus dem Energiegesetz die Notwendigkeit einer kinetischen Betrachtungsweise des Naturgeschehens herleiten, wie R. Mayer durchaus richtig erkannt hat. Diese legt also einen weiteren Begriff zugrunde als jenes, und Helmholtz hat eben gerade festzustellen gesucht, durch welche näheren Bestimmungen der umfassendere Begriff auf den engeren eingeschränkt wird.

Helmholtz hat aber nicht nur eine Begründung des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft geleistet. Eine solche war ja auch schon von R. Mayer gegeben worden, wenn auch in einer für Physiker wenig schmackhaften Weise. Wichtiger ist die Form, in die Helmholtz den Satz gegossen, und durch die er zu seiner Überführung in das allgemeine wissenschaftliche Bewußtsein ganz erheblich beigetragen hat. R. Mayer legt den Nachdruck auf die allgemeine Umwandlungsmöglichkeit aller Kräfte ineinander; so wenig wie Kraft aus nichts entsteht, so wenig verschwindet sie in nichts, nur die Art ihrer Betätigung ist dem Wechsel unterworfen und eine irgendwo scheinbar verschwundene Kraftgröße muß stets an irgendeiner Stelle in unverändertem Betrage, wenn auch in veränderter Weise der Betätigung wieder zum Vorschein kommen. Erst bei Helmholtz kommt das Prinzip der Erhaltung zur Geltung. Ein Beispiel möge den Unterschied erläutern. Ein Gewicht von beiläufig 2 kg sei 20 m hoch gehoben worden. Fällt es zunächst 10 m, so erlangt es eine lebendige Kraft, deren Betrag gleich der Arbeitsleistung ist, durch die es 10 m hoch gehoben wird. Diese Seite der Erscheinung betont R. Mayer. Helmholtz aber hebt hervor, daß das 10 m herabgefallene Gewicht neben jenem Betrage lebendiger Kraft noch ein Quantum „Spannkraft", nämlich die Fähigkeit besitzt, weitere Arbeit zu leisten, da es ja nicht nur 10 m, sondern 20 m hoch gehoben wurde. Vermöge seiner Auffassung aller Naturerscheinungen als Bewegungsvorgänge ist er in der Lage, diese Auffassung ohne weiteres zu verallgemeinern und jedem Körpersystem einen bestimmten Vorrat an lebendiger und an Spannkraft zuzuschreiben. Durch eine einfache Umformung des Satzes von der lebendigen Kraft ergibt sich ihm, daß die Summe aus der Quantität der lebendigen und der Spannkräfte eines Systems weder vermehrt noch vermindert werden kann. Gibt man beiden

Kraftarten den gemeinsamen Namen Energie und unterscheidet sie als aktuelle und potentielle Energie, so drückt dieser Satz die Konstanz der Energie eines allen äußeren Einflüssen entzogenen Körpersystems aus. Er gilt unbedingt für unser Planetensystem, insofern eine merkliche Einwirkung der Fixsterne auf dieses zurzeit jedenfalls nicht nachweisbar ist. M. Planck hat darauf hingewiesen, daß die von Helmholtz vollzogene, scheinbar geringfügige Umdeutung das Prinzip der Erhaltung der Kraft in Parallele „mit dem uns schon lange vertrauten und sozusagen in den Instinkt übergegangenen Prinzip der Erhaltung der Materie" gesetzt und seine allgemeine Verwendbarkeit auf allen Gebieten der Physik unmittelbar anschaulich gemacht hat. So wenig wie die verschiedensten physikalischen und chemischen Umwandlungen einer gegebenen Quantität Materie diese Menge abändern können, so wenig läßt sich durch irgendwelche Prozesse die Summe aller in einem Körpersystem aufgespeicherten Kraftvorräte verändern; immer erfolgt nur eine Überführung der verschiedenen Kraftformen ineinander, wobei übrigens nicht notwendig gerade lebendige Kraft in Spannkraft oder Spannkraft in lebendige Kraft verwandelt zu werden braucht, sondern auch eine Form der lebendigen Kraft in eine andere, eine Form der Spannkraft in eine andere übergehen kann, wie man sofort übersieht, wenn man an sichtbare Bewegung, Licht, Wärme, strömende Elektrizität einerseits, an ein gehobenes Gewicht, eine gespannte Feder, den Druck von Flüssigkeiten und Gasen, elektrische Spannungen, chemische Unterschiede andrerseits denkt.

Helmholtz unterzog sich nun der weiteren Aufgabe, die Gültigkeit des Gesetzes von der Erhaltung der Energie unter den hierfür von ihm aufgestellten Bedingungen in den wichtigsten Zweigen der Physik nachzuweisen und damit zugleich seinen Ausgangspunkt zu sichern. Hierbei war eine

Schwierigkeit zu überwinden, die auch jetzt noch nicht in allen Fällen besiegt ist. Welche von den in einem System auftretenden Erscheinungen sind als besondere Kraftarten aufzufassen, also in die Summe aus den lebendigen und Spannkräften des Systems aufzunehmen? Und damit eng zusammenhängend: Welches ist das mechanische Äquivalent jeder Kraftart? Helmholtz hat z. B. bei der Anwendung des Prinzips auf die Wechselwirkung zweier Ströme eine Kraftart übersehen und infolgedessen hier eine unrichtige Äquivalentzahl erhalten. Wir können auf die speziellen Untersuchungen von ihm, die namentlich für die Magnetik und Elektrik weittragende Bedeutung erlangten, hier nicht näher eingehen, da ihr Verständnis gründliche Kenntnisse der theoretischen Physik voraussetzt.

Wie man sich bei der Durchführung des Prinzips in konkreten Einzelfällen vor Irrtümern schützen kann, hat M. Planck ausgeführt. Auf Grund der Erfahrung muß man sich gewisse Vorstellungen über die Natur der zu untersuchenden Erscheinungen verschaffen, die sich um so einfacher gestalten dürfen, je geringere, die um so verwickelter werden müssen, je größere Ansprüche man an die zu erlangenden Ergebnisse stellt. Jedenfalls aber sind die einmal eingeführten Vorstellungen bei den weiteren Betrachtungen dann auch festzuhalten. So mag es z. B. im einfachsten Falle genügen, für eine tropfbare Flüssigkeit nur die Eigenschaft der Inkompressibilität in Betracht zu ziehen. Genauere Ergebnisse erhält man, wenn man sich die im Innern der Flüssigkeit wirkenden Kräfte durch Veränderungen der Dichte hervorgerufen denkt. Auf einer weiteren Stufe wird zu diesen Druckkräften noch die aus der sogenannten Zähigkeit der Flüssigkeit entspringende „Reibung“ hinzugenommen. Endlich kann man die Vorstellung der Flüssigkeit als eines Kontinuum aufgeben und muß dann noch die zwischen den kleinsten Teilchen

wirkenden Molekularkräfte in Betracht ziehen. „Jeder dieser verschiedenen genannten Vorstellungen entspricht eine besondere Form der Energiearten und also eine verschiedene Anwendung des Prinzips der Erhaltung der Energie" (Planck, S. 164), und es ergibt sich hieraus zugleich, daß diese Anwendung wesentlich von dem Wechsel in den herrschenden physikalischen Anschauungen beeinflußt werden muß, während die unveränderliche Geltung des Prinzips selbst für alle Zeiten wohl kaum noch einem Zweifel unterliegt. — Helmholtz schließt seine Arbeit „Über die Erhaltung der Kraft" mit den Sätzen: „Ich glaube durch das Angeführte bewiesen zu haben, daß das besprochene Gesetz keiner der bisher bekannten Tatsachen der Naturwissenschaften widerspricht, von einer großen Zahl derselben aber in einer auffallenden Weise bestätigt wird. Ich habe mich bemüht, die Folgerungen möglichst vollständig aufzustellen, welche aus der Kombination desselben mit den bisher bekannten Gesetzen der Naturerscheinungen sich ergeben, und welche ihre Bestätigung durch das Experiment noch erwarten müssen. Der Zweck dieser Untersuchung, der mich zugleich wegen der hypothetischen Teile derselben entschuldigen mag, war, den Physikern in möglichster Vollständigkeit die theoretische, praktische und heuristische Wichtigkeit dieses Gesetzes darzulegen, dessen vollständige Bestätigung wohl als eine der Hauptaufgaben der nächsten Zukunft der Physik betrachtet werden muß."

Das Gesetz von der Erhaltung der Energie gewährt einen wichtigen Einblick in die Art des Geschehens, wenn etwas geschieht. Es klärt aber nicht im geringsten darüber auf, unter welchen Bedingungen Umformung von Energie eintritt und auf welchen Wegen sich die Umwandlung vollzieht. Es gleicht einer Eisenbahnkarte ohne Kursbuch. Man erkannte aber sehr bald, daß sich auch über die Umwandlungs-

möglichkeit von Energie gewisse allgemeine Sätze aufstellen lassen. Clausius ging von dem Axiom aus, daß Wärme nicht von selbst aus einem Körper von niederer Temperatur in einen solchen von höherer Temperatur übergehen könne und leitete daraus im Anschluß an eine Untersuchung von Carnot den sogenannten zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie ab, daß alle in der Natur vorkommenden Verwandlungen in einem gewissen Sinne, dem sogenannten positiven, von selbst, d. h. ohne Kompensation, geschehen, daß sie aber im entgegengesetzten, also negativen Sinne, nur unter Kompensation durch gleichzeitige positive Verwandlungen stattfinden können. Beispiele positiver Verwandlungen sind Übergang von Wärme aus einem wärmeren in einen kälteren Körper, Verwandlungen lebendiger Kraft oder von Energie der Lage, also auch elektrischer Energie in Wärme, negativ sind die entgegengesetzt gerichteten, die „nur auf Umwegen, d. h. durch Zuhilfenahme vermittelnder Kräfte, die hierbei selbst positive Verwandlungen erfahren, bewirkt werden" können; so wird in der Dampfmaschine Wärme in Arbeit nur unter dem gleichzeitigen Übergang von Wärme in den Kondensator oder in die Atmosphäre verwandelt. W. Thomson ging von der Annahme aus, daß es unmöglich sei, „mit Hilfe unbeseelter Körper irgendwelche mechanische Leistung durch irgendeine Substanz zu erzielen, wenn ihre Temperatur niedriger ist, als die tiefste aller sie umgebenden Körper" und wies darauf hin, „daß nicht alle Energieformen trotz gleicher Größe auch von gleicher Umwandlungsfähigkeit seien und daß z. B. eine Transformation der Wärme unter Umständen überhaupt nicht mehr möglich sein könne". Eine Verallgemeinerung dieser an die besondere Energieform der Wärme anknüpfenden Betrachtungen wurde durch die mechanische Wärmetheorie nahe gelegt. Nach dieser ist die

Wärme eines Körpers ja Bewegungsenergie seiner Moleküle und die Axiome von Clausius und Thomson müssen sich daher als Theoreme über reine Bewegungsvorgänge verständlich machen lassen. In der Tat ist die Gültigkeit des folgenden, mit dem zweiten Hauptsatze verwandten Satzes leicht ersichtlich: „Wenn in einem isolierten, materiellen System die Bewegungen der einzelnen Teile sich so ausgeglichen haben, daß alle Geschwindigkeiten gleich groß und gleich gerichtet sind, so ist trotz einer beliebigen Größe der absoluten Energie die nutzbare Energie des Systems doch gleich Null" (Rosenberger). Die mechanische Umdeutung des zweiten Hauptsatzes, die ihn zu einem Prinzip aller Energieumwandlungen und damit zu einem nicht nur die Wärmelehre, sondern das ganze Gebiet der Physik beherrschenden Satze erhob, ist zuerst von Boltzmann in Angriff genommen worden. In ähnlicher Richtung ist nun auch Helmholtz in der zweiten Hälfte seines Lebens tätig gewesen. Wie Boltzmann wurde er dabei auf das Prinzip der kleinsten Wirkung als das eigentlich zentrale, alle physikalischen Vorgänge umfassende Gesetz geführt. Ausgesprochen wurde das principe de la moindre quantité d'action zuerst von Maupertuis 1747, und zwar betrachtete er als Maß der Wirkung das Produkt m v s aus Masse m, Geschwindigkeit v und Weg s eines Körpers, eine Größe, die schon Leibniz als die Leistung des Beharrungsvermögens bezeichnet hatte, durch die sich der mit Masse erfüllte vom rein geometrischen Raum unterscheidet. Von der unklaren, halb mystischen Verwendung des Prinzips durch seinen Urheber wollte indessen Helmholtz nichts wissen. Metaphysische Spekulationen wie die von Maupertuis, daß sich die Natur bei allen ihren Verrichtungen der einfachsten Mittel bediene und bei jedem Vorgang demnach eine bestimmte Größe ein Minimum werden müsse, dessen Ermittlung dem Forscher zugleich ver-

rate, wo die Natur spare und damit einen Einblick in den Plan des Weltenschöpfers gewähre, können die Wissenschaft nur in die Irre führen. Helmholtz setzte an ihre Stelle überall bestimmte, mathematisch formulierte Begriffe und streng analytische Entwicklungen und hob hervor, daß der theoretische Wert des Prinzips wesentlich darauf beruhe, daß in ihm „nur noch die Rede ist von den beiden Hauptformen der Energie, deren Gesamtwert unveränderlich und ewig ist, die aber in den mannigfaltigsten Erscheinungsformen in den Naturkörpern hin und her wallt. Den Verlauf dieses Hin- und Herwallens der Energie bringt dieses Prinzip unter eine kurze, aber alles umfassende Regel, und damit macht es alles Geschehen in der Welt ganz allein und vollständig abhängig von der (zur)zeitigen Verteilung der Energie." Fast bis zu seinem Tode ist Helmholtz immer wieder auf diesen Gedanken zurückgekommen; aber ein völlig abschließendes Ergebnis blieb ihm hier versagt und ist auch jetzt noch nicht erreicht.

Schon in seiner physikalischen Erstlingsschrift „Über die Erhaltung der Kraft" hat Helmholtz seine besondere Aufmerksamkeit den elektrischen und magnetischen Vorgängen zugewandt. Auch ein großer Teil seiner späteren Lebensarbeit war diesem Gebiete gewidmet. Neben dem unmittelbaren Interesse an den hierher gehörigen Erscheinungen war dabei wohl die Überzeugung für ihn ein treibendes Motiv, daß der Streit zwischen den auf Newtons Autorität sich stützenden Anhängern einer unmittelbaren Fernwirkung und den Faradays Spuren folgenden Vertretern einer Vermittlung aller Kraftwirkungen durch das zwischen den aufeinander wirkenden Körpern liegende Medium hier eine unanfechtbare Entscheidung erhoffen lasse, die für das ganze Gebiet der Physik von grundsätzlicher Bedeutung werden mußte. Irgendwelche Instanzen gegen die

Faradayschen Anschauungen waren freilich nicht aufgefunden worden; aber so lange man meinte, mit der älteren Auffassung allen Tatsachen gerecht werden zu können, lag offenbar keine Veranlassung vor, für die bewährten Vorstellungen die schwierigen neuen Begriffe einzutauschen. Helmholtz selbst erzählt in seiner Faraday-Vorlesung „Die neuere Entwicklung von Faradays Ideen über Elektrizität", die er am 5. April 1881 vor der Chemischen Gesellschaft zu London hielt, wie er oft „gesessen habe, hoffnungslos auf eine seiner (Faradays) Beschreibungen von Kraftlinien und von deren Zahl und Spannung starrend, oder den Sinn von Sätzen suchend, wo der galvanische Strom als eine Achse der Kraft bezeichnet wird und ähnliches mehr". Kein Wunder, daß man sich solchen Schwierigkeiten gegenüber ablehnend verhielt, so lange es irgend ging. Das kritische Gebiet, auf dem der Kampf ausgefochten werden mußte, war die Theorie der elektrischen Ströme. Der Faraday-Maxwellschen Lehre standen hier zwei Hypothesen gegenüber. Die eine wurde hauptsächlich von W. Weber, Riemann und Clausius verfochten. Diese Männer versuchten „die elektrodynamischen Erscheinungen aus der Annahme von Fernkräften herzuleiten, die zwischen je zwei Quantis der hypothetischen elektrischen Fluida wirken sollten, deren Intensität aber nicht allein von deren Entfernung, sondern auch von deren Geschwindigkeiten und Beschleunigungen abhängen sollte". Die Phänomene geschlossener Ströme lassen sich in der Tat auf diesem Wege zutreffend ableiten. Bei der Anwendung auf ungeschlossene Ströme aber kommt man in Widerspruch, sei es mit dem Gesetz von der Konstanz der Energie, sei es mit dem Axiom der Gleichheit von Aktion und Reaktion, sei es mit beiden. Die andere Hypothese wurde zuerst von Ampère aufgestellt, später von F. E. Neumann als Potentialgesetz umfassend mathematisch formu-

liert und von Helmholtz noch etwas weiter verallgemeinert. Hier werden die anziehenden und abstoßenden Fernkräfte nicht zwischen je zwei Punkten, sondern zwischen kleinsten Längenelementen der Leiter angenommen, sie erscheinen als Funktionen des Winkels zwischen den beiden Elementen selbst und der Winkel zwischen diesen Elementen und der Richtung ihrer Verbindungslinie. Helmholtz konnte nachweisen, daß das Neumannsche Potentialgesetz sämtliche Erscheinungen geschlossener Ströme qualitativ richtig und quantitativ genau darstelle und sich auch auf die wenigen bekannten, meist außerordentlich schwachen elektrodynamischen Wirkungen ungeschlossener Ströme anwenden lasse, ohne zu Widersprüchen mit den Axiomen der Mechanik zu führen.

Während also jene erste Hypothese unbedingt abzuweisen war, blieb dieser zweiten zunächst der Schein der Berechtigung. Helmholtz ging nun aber sogleich darauf aus, durch seine mathematischen Überlegungen auch die Richtung zu finden, in der Versuche zur Entscheidung zwischen den verschiedenen möglichen Theorien anzustellen seien. Es gelang ihm, „einen solchen Versuch über die Elektrizität, die sich an der Oberfläche eines im magnetischen Felde rotierenden Leiters sammelt, auszuführen". Nach den gewöhnlichen Induktionsgesetzen muß nämlich in einem solchen um die Achse eines Magneten sich drehenden Leiter eine elektromotorische Kraft induziert werden, während dies nach dem Neumannschen Potentialgesetz allein nicht der Fall wäre. Der Versuch führte nur dann auf keinen Widerspruch, „wenn man die Existenz des Potentialgesetzes mit der Faradayschen Annahme vereinigte, daß die in den Isolatoren zwischen zwei sich ladenden Leitern zustande kommende dielektrische Polarisation eine „elektrische Bewegung ist, die dem jene Leiterstücke ladenden Strom äquivalente

Intensität und äquivalente elektrodynamische Wirkung hat". So ergab sich schließlich für Helmholtz Faradays Annahme als „die einzige, die mit allen beobachteten Tatsachen zusammenstimmt und die durch keine ihrer Folgerungen in Widerspruch mit den allgemeinen Grundsätzen der Dynamik tritt", und er fand auch die aus ihr für ungeschlossene Ströme gezogenen Schlüsse durch Versuche bestätigt. Läßt man in den Hypothesen von C. F. Neumann, Weber, Clausius die dielektrische Polarisation in allen zwischen den Leiterstücken liegenden Isolatoren zur Geltung kommen und zwar in solcher Stärke, daß die mit der Herstellung dieses Zustandes verbundene Bewegung der Elektrizitäten als eine gleichwertige Fortsetzung des die Leiter ladenden elektrischen Stroms erscheint, so verschwinden auch hier alle Unstimmigkeiten; es gibt dann nur noch geschlossene Ströme, und für solche hatte sich ja jede der besprochenen Hypothesen als gültige Beschreibung erwiesen. Anderseits aber spielen bei dieser Annahme unmittelbare Fernkräfte keine Rolle mehr gegenüber den dielektrischen und magnetischen Spannungen in den Isolatoren, beziehentlich im raumfüllenden Äther.

Immerhin fehlte in dieser Beweiskette für die Faraday-Maxwellsche Theorie noch ein wichtiges Glied, um dessen Beschaffung sich schon Faraday vergeblich bemüht hatte. Sind alle Induktionswirkungen tatsächlich im wesentlichen Vorgänge im Dielektrikum, die an den begrenzenden Leitern nur deutlich in die Erscheinung treten, ähnlich wie die Spannkraft des Dampfes in dem Zylinder einer Dampfmaschine sich in den Bewegungen des Kolbens offenbart, so ist zu ihrer Ausbreitung Zeit nötig. Durch das Experiment mußte diese Zeit ermittelt und zugleich der Nachweis erbracht werden, daß das Entstehen und Vergehen dielektrischer Polarisation in einem Isolator dieselben elektrodynamischen Wirkungen in der Umgebung hervorbringt, wie ein gewöhnlicher gal-

vanischer Strom. Helmholtz erkannte richtig die Anfänge des Weges, der hier zum Ziele zu führen versprach, und er wußte unter seinen Schülern den Mann, der die Fähigkeit besaß, ihn erfolgreich bis ans Ende zu gehen. Er machte das Problem zu einer Preisfrage der Berliner Akademie der Wissenschaften in der gewissen Überzeugung, daß Heinrich Hertz die Lösung finden werde, und er sah sich nicht getäuscht. Durch die berühmten Versuche des genialen, leider allzu früh verstorbenen Physikers wurde die Geschwindigkeit der Fortpflanzung der elektrischen Kraft zu 310 000 km in der Sekunde, also gleich der Lichtgeschwindigkeit gefunden und damit eine der wesentlichsten theoretischen Folgerungen der Faraday-Maxwellschen Anschauungen experimentell bestätigt. Ist die Annahme des Äthers zur Erklärung der ungeheuren Lichtgeschwindigkeit erforderlich, so muß er nun offenbar auch die Ausbreitung der elektrodynamischen Induktionswirkungen vermitteln. Die Experimente von Hertz bewiesen aber noch mehr; sie zeigten, daß diese Ausbreitung genau den gleichen periodischen Charakter wie die Wellenbewegung des Lichts und der strahlenden Wärme besitzt und nur ein Unterschied in den Wellenlängen bzw. der Dauer der Schwingungen besteht.

Helmholtz hat aber nicht nur durch seinen Einfluß auf die großen Entdeckungen von Hertz seinen Namen mit der neuesten Entwicklung der Elektrizitätslehre verknüpft. Auch die Jonentheorie verdankt ihm die klare und bestimmte Ausarbeitung ihres Grundbegriffes. Helmholtz geht hierbei von dem Faradayschen Gesetze der festen elektrolytischen Wirkung aus. Er sieht die in ihm ausgedrückten Tatsachen vom Standpunkt der modernen chemischen Valenztheorie an, nach der die Atome verschiedener Elemente, je nach ihrem Valenzwerte, entweder einem, oder zweien, dreien oder vier Atomen Wasserstoff äquivalent sind. Das Fara-



Heinrich Hertz

daysche Gesetz behauptet dann, „daß dieselbe Menge Elektrizität, wenn sie durch irgendeinen Elektrolyten fließt, immer dieselbe Menge von Valenzwerten an beiden Elektroden entweder frei macht oder in andere Verbindungen überführt“. Das Erscheinen der Zersetzungsprodukte an den Elektroden setzt aber Bewegungen der den Elektrolyten zusammensetzenden chemischen Elemente, der „Jonen“, längs der ganzen Strombahn voraus. Der Gesamtbetrag der chemischen Bewegung in jedem Querschnitt der Flüssigkeit kann durch die Summe der hindurchgegangenen Jonen, Anionen und Kationen dargestellt werden, gerade so wie nach der dualistischen Theorie der Elektrizität die durch einen Querschnitt des Leiters fließende Elektrizität sich aus der hindurchgehenden positiven und negativen Elektrizität zusammensetzt. „Wir können nun,“ sagt Helmholtz in seiner Faraday-Vorlesung, „Faradays Gesetz so aussprechen, daß durch jeden Querschnitt eines elektrischen Leiters wir immer äquivalente elektrische und chemische Bewegung haben. Genau dieselbe bestimmte Menge, sei es positiver, sei es negativer Elektrizität bewegt sich mit jedem einwertigen Jon, oder mit jedem Valenzwert eines mehrwertigen Jon, und begleitet es unzertrennlich bei allen Bewegungen, die dasselbe durch die Flüssigkeit macht. Diese Quantität können wir die elektrische Ladung des Jon nennen.“ Dieser Ausdruck der tatsächlich vorliegenden Erfahrungen führt im Zusammenhang mit der chemischen Atomtheorie Helmholtz zu der wichtigen, den Keim der Elektronentheorie enthaltenden Schlußfolgerung „daß auch die Elektrizität, positive sowohl wie negative, in bestimmte elementare Quanta geteilt ist, die sich wie Atome der Elektrizität verhalten“. Jedes Jon ist während seiner Bewegung im Elektrolyten für jeden seiner Valenzwerte mit je einem elektrischen Äquivalent verkettet; eine Trennung kann nur an den Elektroden

eintreten, wenn dort hinreichend große elektromotorische Kräfte wirken.

Helmholtz macht darauf aufmerksam, wie es beim ersten Anblick überraschend erscheinen muß, daß die schwachen Anziehungen der Pole einer Batterie, beispielsweise von zwei Daniellelementen die gewaltigen chemischen Anziehungskräfte zu überwinden und z. B. Wasser zu zersetzen vermögen. Des Rätsels Lösung ergibt sich aber, wenn man beachtet, daß nach dem Coulombschen Gesetz die Gesamtkraft, die ein elektrischer Körper auf einen anderen ausübt, proportional sowohl der Elektrizitätsmenge des anziehenden, als auch der des angezogenen Körpers ist. Die Ladungen der Atome selbst sind eben von einer ganz gewaltigen Größe, wie sich aus Versuchen von R. Bunsen, W. Weber und Cl. Maxwell ergeben hat. „Wir finden, daß Wasserstoff und Sauerstoff des Wassers, wenn sie, ohne ihre elektrischen Ladungen zu verlieren, voneinander getrennt werden könnten, eine Anziehung aufeinander ausüben würden, gleich der Gravitation von Massen, die ihnen 400 000-Billionenmal an Gewicht überlegen wären."

Weiter sucht nun Helmholtz auf Grund fremder und eigener Untersuchungen die Frage zu beantworten, welche Kräfte nötig sind, um die Jonen in Vereinigung mit ihren elektrischen Ladungen durch das Innere der Flüssigkeit fortzutreiben und welche zur Trennung des Jons von seiner Ladung und seinen bisherigen chemischen Verbindungen gebraucht werden. Er findet durch Beobachtung der Polarisationsvorgänge in einem selbst konstruierten Voltameter, einem Glasgefäß, das angesäuertes Wasser enthält und nach möglichster Befreiung von allen Gasen zugeschmolzen worden ist, daß sich keine untere Grenze für die elektromotorischen Kräfte angeben läßt, die die Loslösung der Jonen voneinander und ihre Wanderung verursachen. Er

schließt daraus, daß der Zusammenhalt in jedem Paare eines Anion und Kation nur von der gegenseitigen Anziehung ihrer elektrischen Ladungen herrührt, nicht aber daneben noch durch irgendeine besondere chemische Kraft bedingt ist; denn eine solche würde doch irgendeinen kleinen Aufwand von Arbeit zu ihrer Überwindung erfordern.

Im Gegensatz zu diesen Vorgängen erfordert die Trennung eines Jon von seiner elektrischen Ladung eine erhebliche Arbeitsleistung. Diese kann eine rein mechanische sein, so, wenn die in die Elektroden der Zersetzungszelle eingetriebenen Elektrizitäten durch Bewegung einer gewöhnlichen Reibungs- oder einer Influenzelektrisiermaschine oder durch eine Dynamomaschine erzeugt werden. Wird die Arbeit durch eine galvanische Batterie verrichtet, so finden in ihr chemische Arbeitsprozesse statt, deren Größe wenigstens angenähert aus der Wärmemenge berechnet werden kann, die bei der Verbindung der in Wirksamkeit tretenden chemischen Elemente auftreten würde.

„Erst wenn man die Potentialdifferenz der Elektroden so weit steigert, daß sie die elektrischen Ladungen der Jonen hinreichend kräftig anziehen, um sie zu sich hinüber zu reißen, werden die Jonen selbst frei, um anderen mechanischen Kräften zu folgen und die Elektroden zu verlassen, beziehentlich sich als Gase zu entwickeln." Wäre der wägbare Teil der Jonen der Anziehung der Elektroden unterworfen, so müßten jene an diesen auch nach ihrer Entladung fest haften. Da dies nicht geschieht, ist zu schließen, daß die Jonen „nur, weil und solange sie elektrisch geladen sind, zur entgegengesetzt geladenen Elektrode gezogen werden."

Helmholtz betrachtet jede Elektrode als die eine, die unmittelbar an ihr haftende Jonenschicht als die andere Platte eines Kondensators. Die Anziehungskraft, die in einem solchen auf die Einheit des elektrischen Quantums wirkt,

das an der Innenseite einer der Ladungsschichten liegt, ist dem Abstand der geladenen beiden Grenzflächen umgekehrt proportional. Helmholtz berechnet diesen Abstand für den vorliegenden Fall in annähernder Übereinstimmung mit Kohlrausch auf den zehnmillionsten Teil eines Millimeters, d. h. auf den ungefähren Betrag des Wirkungskreises der Molekularkräfte. Daraus folgt, daß hier die Anziehungskraft 10 Millionen mal größer ist, als bei einem Abstand der Kondensatorplatten von 1mm. Es ist wohl begreiflich, „daß unter diesen Umständen selbst eine mäßige elektromotorische Kraft den mächtigen chemischen Kräften den Rang ablaufen kann, die jedes Atom mit seiner elektrischen Ladung verbinden und die Atome in der Flüssigkeit festhalten."

Wenn sich übrigens Helmholtz in der Faraday-Vorlesung an das Bild der dualistischen Elektrizitätshypothese hält, so geschieht dies wohl mehr mit Rücksicht auf die leichtere Verständlichkeit als aus Überzeugung von der Richtigkeit dieser Anschauung. In einer kurzen Aufzeichnung „Nachträgliche Betrachtungen zur Faraday-Lektüre" betont er, daß jene Theorie eine überflüssig große Zahl von Hypothesen und hypothetischen Apparaten nur zu dem Zwecke in Bewegung setzt, eine vollkommene Analogie für die Wirkungen positiver und negativer Elektrizitäten zu bewahren, und macht einen Versuch, wie weit man mit der unitarischen Hypothese gelangen kann. In einer zweiten Aufzeichnung „Zur elektrodynamischen Theorie optischer Erscheinungen" skizziert er noch einmal die Hauptpunkte seiner elektrochemischen Ansichten: jede Valenz des Jon einer elektrolytisch zerlegbaren chemischen Verbindung ist mit einem Äquivalent entweder positiver oder negativer Elektrizität verbunden, solange der Elektrolyt noch nicht zerlegt ist; die Valenzen verschiedener Elemente, möglichenfalls auch die verschiedenen Valenzen desselben Atoms

üben verschiedene Anziehungskräfte gegen die Äquivalente der beiden Elektrizitäten aus; diese Anziehungen und die der gleichnamigen Elektrizitäten untereinander machen den wesentlichsten Teil der chemischen Verwandtschaftskräfte aus. Im Anschluß hieran betont er, daß sich alle diese Annahmen auch in Beziehung zur Maxwellschen Darstellungsweise bringen lassen. Man braucht zu diesem Zwecke nur die Valenzstellen eines Atoms als Orte aufzufassen, die Spannungszentra des Äthers sind, und hat die Möglichkeit festzuhalten, daß bei chemischen Zersetzungen ein solches Spannungszentrum auf ein anderes Atom hinübergleite, und daß verschiedene chemische Elemente verschiedene Anziehung zu dem positiven und negativen Ende der Kraftlinien haben, so daß verhältnismäßig große Arbeitsbeträge durch eine solche Auswechslung des positiven mit dem negativen Ende des Kraftlinienbündels geleistet werden können.

Die Studienzeit und die Anfänge selbständiger wissenschaftlicher Forschung von Helmholtz fielen in eine Epoche, in der unter der Führung des berühmten Berliner Physiologen Johannes Müller, zu dessen Schülern sich Helmholtz mit du Bois-Reymond, Brücke, Ludwig zählen durfte, die Physiologie in neue Bahnen lenkte. Ihre Loslösung von der Metaphysik und ihre exakte Begründung durch die Physik war das Ziel, das mit Genialität und ausdauerndem Fleiße von jenen Männern verfolgt wurde. Welche Widerstände es dabei zu überwinden galt, läßt die Äußerung eines Physiologen erkennen, der auf die Aufforderung von Helmholtz, sich gewisse Bilder im Auge anzusehen, erwiderte, ein Physiologe habe nichts mit Versuchen zu tun, die seien gut für den Physiker; nicht minder der Rat eines medizinischen Professors an Helmholtz, auf der Hochschule den eigentlichen gedanklichen Teil der Physiologie selbst vorzutragen, die „niedere“ experimentelle Seite einem Kol-

legen zu überlassen. Helmholtz sah hier also noch viel jungfräulichen Boden vor sich. Seine Leistungen auf diesem Gebiete haben nicht nur seinen wissenschaftlichen Ruhm zuerst begründet, sondern ihm auch eine ungewöhnliche Popularität in allen gebildeten Kreisen verschafft.

Seine Doktordissertation von 1842 stellte für wirbellose Tiere die wichtige Tatsache fest, daß die Nervenfasern aus den von Ehrenberg 1833 entdeckten Ganglienzellen entspringen und gab damit den Nachweis für die zentrale Natur dieser Zellen. 1850 folgten die „Messungen über den zeitlichen Verlauf der Zuckungen animalischer Muskeln und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizungen in den Nerven“ und verwandte Abhandlungen, deren Material er aus äußerst feinen Versuchen mit Hilfe von zum großen Teile selbst erfundenen sinnreichen Apparaten gewann. Noch wenige Jahre vorher hatte Johannes Müller die Möglichkeit, jemals die Geschwindigkeit der Nervenwirkung festzustellen, ernstlich bezweifelt, weil er sie für außerordentlich groß hielt. Diese Ansicht ergab sich ihm und anderen Physiologen aus dem Glauben, daß die Ausbreitung der Nervenwirkungen durch ein imponderables Mittel oder ein psychisches Prinzip erfolge. Helmholtz dagegen war durch Untersuchungen von du Bois-Reymond zu der Überzeugung gelangt, daß die Fortleitung einer Nervenreizung wesentlich durch eine veränderte Anordnung der Moleküle des Nerven bedingt sei, ihre Geschwindigkeit mäßig und daher durchaus meßbar sein müsse. Er fand sie in der Tat über zehnmal kleiner als die Schallgeschwindigkeit in der Luft und konnte daraus rückwärts auf die Unzulässigkeit jener älteren physiologischen Auffassung des Nervenagens als eines imponderablen Prinzips schließen. „Glücklicherweise,“ sagt er, „sind die Strecken kurz, welche unsere Sinneswahrnehmungen zu durchlaufen haben, ehe sie zum Gehirn

kommen, sonst würden wir mit unserem Bewußtsein weit hinter der Gegenwart und selbst hinter den Schallwahrnehmungen hinterherhinken."

Ende 1850 erfand Helmholtz den Augenspiegel und schuf dadurch eine neue Grundlage für die Lehre vom Auge und die Augenheilkunde, auf der namentlich der berühmte Ophthalmologe Gräfe weiter gebaut hat. Nach seiner Angabe ist er auf die Erfindung durch Brückes Theorie des Augenleuchtens, die er bei der Vorbereitung auf eine Vorlesung gründlich durchdachte, geführt worden. Er stieß dabei auf die Frage, „welchem optischen Bilde die aus dem leuchtenden Auge zurückkommenden Strahlen angehörten". Brücke hatte nämlich in Verfolgung der Angabe von Johannes Müller, daß die sogenannten leuchtenden Augen nur Licht reflektieren, festgestellt, „daß man die Augen der Tiere am besten leuchten sieht, wenn man in einem dunklen Raume eine Blendlaterne auf das zu beobachtende Auge richtet und an dieser vorbei in das Auge blickt". Helmholtz stellte nun durch mathematische Überlegung und durch experimentelle Untersuchungen vermittelst einer Camera obscura fest, daß das von einem leuchtenden Punkte außerhalb eines Auges in dieses eindringende Licht nach seiner Zurückwerfung am Hintergrunde des Auges und Brechung in dessen verschiedenen Medien schließlich wieder vollständig zu seinem Ausgangspunkt zurückkehrt. In die Augenpupille des Beobachters eines fremden Auges kann daher unter gewöhnlichen Umständen nur Licht gelangen, das von ihr selbst ausgegangen ist; es wird ihr nur diejenige Netzhautstelle sichtbar, auf der ihr eigenes dunkles Bild sich abbildet; alles, was wir vom Hintergrund eines unverletzten Auges erblicken, erscheint völlig dunkel; höchstens vermag ein Beobachter, der sich, wie bei Brückes Versuch, der Richtungslinie des einfallenden Lichtes möglichst annähert, einen Teil

des austretenden Lichtes wahrzunehmen. Läßt man aber das Licht einer zur Seite des beobachtenden Auges stehenden hellen Lichtquelle zunächst auf drei aufeinander gelegte parallele Glasplatten und von da in das zu untersuchende Auge fallen, so wird nur ein Teil davon nach dem Verlassen des Auges durch Spiegelung an den Glasplatten wieder zur Lichtquelle zurückgeworfen, ein anderer Teil kann durch die Glasplatten hindurch zum Auge des Beobachters geleitet werden. Zur Erzielung eines ausreichend großen Gesichtsfeldes ist dabei zugleich möglichste Annäherung der beiden Augen aneinander und infolgedessen wiederum zur Herstellung ausreichender Divergenz der abbildenden Strahlen das Anbringen einer Konkavlinse zwischen Spiegel und beobachtendem Auge erforderlich. Helmholtz selbst hat die Erfindung des Augenspiegels immer nur als einen glücklichen Fund bezeichnet. „Sie lag eigentlich so auf der Hand“, schrieb er an seinen Vater, „erforderte weiter keine Kenntnisse, als was ich auf dem Gymnasium von Optik gelernt hatte, daß es mir jetzt lächerlich vorkommt, wie andere Leute und ich selbst so vernagelt sein konnten, sie nicht zu finden.“ Man sieht aber schon aus den Überlegungen, die zu dem glücklichen Ergebnis führten, daß sich die Sache doch nicht so ganz einfach ergab. Auch war das erste Instrument, das sich Helmholtz aus Brillengläsern und Deckgläschen für mikroskopische Objekte zusammenkittete, so mühsam zu gebrauchen, daß er später erzählte: „Ohne die gesicherte theoretische Überzeugung, daß es gehen müßte, hätte ich vielleicht nicht ausgeharrt. Aber nach etwa acht Tagen hatte ich die große Freude, der erste zu sein, der eine lebende menschliche Netzhaut klar vor sich liegen sah.“ Die junge ophthalmologische Gesellschaft in Heidelberg erwies ihm daher 1858 bei seiner Übersiedelung an die Universität der Neckarstadt durch Überreichung eines Pokals mit der In-

schrift: „Dem Schöpfer der neuen Wissenschaft, dem Wohltäter der Menschheit in dankbarer Erinnerung an die Erfindung des Augenspiegels" eine wohlverdiente Ehrung.

Helmholtz schenkte der Augenkunde auch einen wichtigen Meßapparat, das Ophthalmometer. Die Aufgabe, am lebenden Auge die Krümmung der brechenden Flächen, wie der vorderen Hornhautfläche oder der beiden Begrenzungsflächen der Kristallinse zu messen, ist dadurch lösbar, daß man die Größe der von diesen Flächen durch Spiegelung erzeugten Bildchen äußerer Objekte mißt, da zwischen der Bildgröße und dem Krümmungsradius einer konvexen spiegelnden Fläche eine bestimmte mathematische Beziehung besteht. Die fortwährenden Bewegungen des Auges machen aber eine unmittelbare Messung der ständig hin- und herschwankenden Bildchen unmöglich. Die Schwierigkeit ist die gleiche, wie sie sich der exakten Bestimmung des Durchmessers der bewegten Sonnenscheibe oder des Abstandes von zwei nahe benachbarten Fixsternen infolge der scheinbaren Drehung des Himmelsgewölbes entgegenstellt. Durch das von Bouguer 1748 erfundene und von Dollond verbesserte Heliometer wurde in der Astronomie dieses Hindernis glücklich besiegt. Ein diametraler Schnitt zerlegt das Objektiv eines Fernrohres in zwei gleiche Hälften, deren eine mit dem Tubus fest verbunden ist, während sich die andere durch eine Mikrometerschraube längs der Schnittfläche verschieben läßt. Ein solches Instrument erzeugt z. B. von der Sonnenscheibe zwei Bilder, die sich vollkommen decken, so lange sich die beiden Hälften des Objektivs längs der ganzen Schnittfläche berühren, sich aber bei einer Verschiebung der beweglichen Objektivhälfte voneinander trennen. Erzeugt man durch Drehung der Schraube zwei Bilder der Sonnenscheibe, die sich gerade berühren, wobei die beide Bilder gleichmäßig betreffende Bewegung der

Sonne selbstverständlich einflußlos ist, so hat man die Schraube um einen Betrag gedreht, der ein genaues Maß der Verschiebung des zweiten Bildes gerade um die Größe des scheinbaren Durchmessers der Sonne ist. Indem man nun das Instrument zunächst auf einen schwarz umrahmten weißen Kreis richtet, dessen Durchmesser direkt gemessen werden kann und der sich in großer, aber genau bekannter Entfernung befindet, so daß sich auch sein scheinbarer Durchmesser in diesem Abstand ermitteln läßt, und die Schraube dreht, bis man zwei sich berührende weiße Kreise sieht, findet man vermittelst Division des scheinbaren Durchmessers durch die Anzahl der erforderlich gewesenen Umdrehungen die einer Schraubenumdrehung entsprechende scheinbare Verschiebung des beweglichen Bildes. Damit aber ist das Instrument graduiert und gebrauchsfertig. Dieses Prinzip des Heliometers hat nun Helmholtz bei der Konstruktion seines Ophthalmometers verwertet. Die Teilung des Objektivs vermeidet er aber dadurch, daß er vor dieses schräg gegen die Achse des Instruments zwei planparallele Glasplatten in gekreuzter Stellung anbringt. Da uns durch eine solche schräg gegen die Gesichtslinie gestellte Platte jedes Objekt um so mehr seitlich verschoben erscheint, je schiefer die Lichtstrahlen auf die Platte fallen, so läßt sich aus der Größe der Drehung der beiden Platten, die erforderlich ist, um die beiden von ihnen erzeugten Bilder zur Berührung zu bringen, auch hier die Größe des beobachteten Gegenstandes berechnen.

Mit Hilfe des Ophthalmometers konnte nun Helmholtz nicht nur die bereits vor ihm von Kramer gefundene Erklärung der Akkommodation zahlenmäßig bestätigen, daß nämlich bei der Anpassung auf das Sehen in der Nähe „sich die vordere Fläche der Linse stärker wölbt, ihr Krümmungshalbmesser also kleiner wird, und ihr Scheitel sich nach vorn

bewegt“, sondern überhaupt den ganzen optischen Apparat des Auges mit größter Schärfe messend durchforschen. Es ergab sich dabei, daß die vordere Hornhautfläche keineswegs eine Kugelkappe, sondern ein Stück eines Ellipsoids ist, „welches durch Umdrehung einer Ellipse um ihre größere Achse erzeugt ist, so daß die Basis der Hornhaut eine auf der großen Achse der Ellipse senkrechte Ebene bildet und ein Scheitelpunkt der Ellipse mit dem Scheitel der Hornhaut zusammenfällt“, daß aber außerdem die Hornhaut meist in ihren verschiedenen Meridianen noch verschieden gekrümmt ist; auch, daß bei der Akkommodation nicht die geringste Krümmungsänderung der Hornhaut stattfindet. Ferner entdeckte er, daß nicht alle brechenden Flächen des Auges eine gemeinsame Mittelpunktsachse haben, die Zentrierung vielmehr eine ungenaue ist; der infolge hiervon und wegen der Gestalt der brechenden Flächen auftretende Astigmatismus des Auges bewirkt, daß wir in gleicher Entfernung befindliche horizontale und vertikale Linien nicht gleichzeitig deutlich sehen können. Nimmt man hierzu noch die Tatsache, daß das Auge keineswegs achromatisch ist, und daß es von punktförmigen leuchtenden Objekten, wie Sternen, infolge der eigentümlichen Struktur der Kristallinse strahlige Bilder gibt — deren achtstrahliger (nicht sechsstrahliger, wie Helmholtz annimmt) Charakter übrigens erst neuerdings von Gullstrand in Upsala völlig geklärt worden ist —, so kann man verstehen, wenn Helmholtz in seinen Vorlesungen über „Die neueren Fortschritte in der Theorie des Sehens“ humoristisch erklärt, daß er sich einem Optiker gegenüber, der ihm ein Instrument mit solchen Fehlern verkaufen wollte, „vollkommen berechtigt glauben würde, die härtesten Ausdrücke über die Nachlässigkeit seiner Arbeit zu gebrauchen, und ihm sein Instrument mit Protest zurückzugeben. In bezug auf meine Augen“, fügt er hinzu, „werde ich freilich

letzteres nicht tun, sondern im Gegenteil froh sein, sie mit ihren Fehlern möglichst lange behalten zu dürfen. Aber der Umstand, daß sie mir trotz dieser Fehler unersetzlich sind, verringert offenbar, wenn wir uns einmal auf den freilich einseitigen aber berechtigten Standpunkt des Optikers stellen, doch die Größe dieser Fehler nicht." Vom entwicklungsgeschichtlichen Standpunkt aus wird man übrigens hervorheben müssen, daß das Auge allen Anforderungen, die im gewöhnlichen normalen Gebrauche an es zu stellen sind, in vorzüglicher Weise angepaßt ist, und alle jene optischen Mängel nur bei besonderer Aufmerksamkeit bemerklich werden.

Die 1856 beginnende Herausgabe eines großen Handbuchs der physiologischen Optik veranlaßte Helmholtz schon seit etwa 1851 nicht nur zu umfassenden historischen Studien und einer gründlichen Durchmusterung der Literatur, sondern auch zu selbständiger Nachprüfung und Begründung aller wesentlichen Punkte durch eigene Beobachtungen und Versuche. Aus der Fülle der neuen Anschauungen, Entdeckungen und Erfindungen, die sich dabei ergaben, kann hier nur einzelnes herausgehoben werden. Bereits in der Habilitationsschrift von 1852 wendet er sich der Untersuchung der zusammengesetzten Farben zu. Gegen eine auf Newtons Autorität hin festgehaltene, aber völlig ungeprüfte Meinung führt er den Nachweis, daß die Mischung von Farbstoffen mit der Zusammensetzung farbiger Lichter durchaus nicht in Vergleich zu stellen ist. Die Mischung eines gelben und blauen Farbstoffes ergibt Grün, die Übereinanderlagerung von indigoblauem und gelbem oder zyanblauem und goldgelbem Licht aber ebensogut Weiß, wie die der übrigen Paare von Komplementärfarben Violett und Grünlichgelb, grünlich Blau und Rot. Er zeigte dies durch einen Versuch, bei dem er die einzelnen Farben zweier Spektra der Reihe nach zur Deckung brachte. Mit diesen Feststellungen war ein

wesentlicher Einwand gegen die Youngsche Farbentheorie beseitigt, nach der alle Farbenempfindungen auf die drei Grundempfindungen von Rot, Grün und Violett zurückzuführen sind, denn durch sie wurde einerseits die Deutung des Grün als einer Mischempfindung ausgeschlossen und andrerseits die Annahme der drei Grundfarben Rot, Gelb, Blau unmöglich gemacht. Helmholtz stellte sich demzufolge bei seinen weiteren Untersuchungen zur Farbenlehre im wesentlichen auf den Standpunkt von Thomas Young und übernahm auch mit gewissen Einschränkungen dessen Hypothese, daß die Oberflächenelemente der Netzhaut eigentümlicher Schwingungen fähig sind, daß an jeder Stelle Teilchen von dreierlei verschiedener Schwingungsdauer sich nebeneinander vorfinden, entsprechend den Oszillationsgeschwindigkeiten der drei Grundfarben, und daß durch gleichzeitige Erregung der verschiedenen Nervenenden die gemischten Empfindungen hervorgebracht werden. Ein bindender Beweis für die Berechtigung dieser Umdeutung physikalischer Farbenmischungen in physiologische Vorgänge ist allerdings bisher nicht erbracht. Auch vermag, wie Wundt hervorgehoben hat, die Dreifarbentheorie zwar die Erscheinungen der Rotblindheit und der Grünblindheit durch den Mangel der roten oder der grünen Grundempfindung, nicht aber die der totalen Farbenblindheit zu erklären, und endlich widerstreiten ihr „die unzweifelhaft vorkommenden Fälle, in denen vorzugsweise solche Teile des Spektrums, die keiner der drei angenommenen Grundfarben entsprechen, farblos gesehen werden" (Wundt, Grundriß der Psychologie, 3. Aufl. 1898, S. 87). Nach v. Kries vermitteln nur die Zapfen der Netzhaut Farbenempfindungen, die Stäbchen die Empfindung farbloser Helligkeit.

Großes Aufsehen unter den zeitgenössischen Physikern wie im gebildeten Laienpublikum erregte eine dem Interesse

der damaligen Zeit an stereoskopischen Instrumenten entgegenkommende optische Konstruktion, die Helmholtz im Juni 1857 dem Niederrheinischen Verein für Natur- und Heilkunde mitteilte. Helmholtz selbst bezeichnet die Erfindung des „Telestereoskops“, d. h. eines Stereoskops für die ferneren Teile der Landschaft, die sich übrigens als eine Nacherfindung ergeben hat, insofern sie bereits 1853 von W. Hardie in England gemacht und veröffentlicht worden war, in einem Briefe an du Bois-Reymond als eine optische Spielerei. Die Tiefenwahrnehmung beim beidäugigen Sehen ist bekanntlich durch die Verschiedenheit der von einem Objekt erzeugten beiden Netzhautbilder bedingt. Dieser Unterschied hängt vom Abstande der Augen des Beobachters, genauer der Augendrehungspunkte, ab, d. h. der Punkte, um die sich die Augäpfel bei Betrachtung größerer Gegenstände in ihren Höhlen drehen, und außerdem von der Entfernung der Gegenstände, sowie von der Sehschärfe. Nimmt man eine halbe Bogenminute als die normale Größe des Winkels an, den der Seitenabstand zweier vertikaler Striche dem Auge bieten muß, wenn der eine nicht als Verlängerung des anderen erscheinen soll, so ergibt sich nach M. von Rohr als Entfernung der Vertikalen, die sich beim beidäugigen Sehen noch eben von einem unendlich fernen Hintergrund abhebt, etwa 344—495 m, wenn der Abstand der Augendrehungspunkte bei verschiedenen Individuen zwischen 50 mm und 72 mm variieren kann (M. von Rohr, Die binokularen Instrumente. Berlin 1907, S. 10). Für größere Entfernungen verschwindet also das Relief der Landschaft. Das Telestereoskop zeigt nun dem Beschauer zwei Bilder der Landschaft stereoskopisch vereinigt, wie sie bei einem wesentlich vergrößerten Augenabstand erhalten werden würden. Es ist ein Wheastonesches Spiegelstereoskop, in dem man aber nicht physische Bilder, sondern Spiegelbilder der Landschaft

selbst betrachtet. Die Objektivstrahlen treffen zunächst auf ein Paar Spiegel von verhältnismäßig großem Abstande, deren Ebenen miteinander einen rechten Winkel bilden, und die mit ihren spiegelnden Flächen den eigentlichen Stereoskopspiegeln parallel gegenübergestellt sind. Nach der Zurückwerfung am ersten Spiegelpaar trifft das Licht auf das zweite und wird von diesem so in die beiden Augen reflektiert, daß wie beim gewöhnlichen Stereoskop ein einheitlicher Eindruck entsteht. In einer zweiten Konstruktion verband Helmholtz das Telestereoskop mit einem Doppelfernrohr, eine Idee, die in neuerer Zeit im Reliefffernrohr der Firma Zeiß in Jena eine handlichere Ausführung gefunden hat. E. Abbe und C. Pulfrich bildeten dann weiter das Instrument durch Anbringen einer stereoskopischen Meßvorrichtung zu einem stereoskopischen Entfernungsmesser, dem Stereo-Telemeter der Zeißwerkstätten aus und verliehen dadurch der „Spielerei“ eine ungeahnte praktische Bedeutung.

Das Handbuch der physiologischen Optik wurde 1866 abgeschlossen. Aber das Interesse von Helmholtz an der Optik war damit nicht erloschen. Seine Untersuchungen führten ihn noch zu einer außerordentlich wichtigen Bereicherung der Theorie des Mikroskopes, die er 1873 in einer Abhandlung „Über die Grenzen der Leistungsfähigkeit der Mikroskope“ und 1874 ausführlicher in dem Jubelband von Poggendorfs Annalen durch den Aufsatz „Die theoretische Grenze für die Leistungsfähigkeit der Mikroskope“ bekannt gab. Hier zerstörte er den herrschenden Glauben an eine ins Unbegrenzte fortsetzbare Verbesserung der Mikroskope durch den Nachweis, daß der Abstand von zwei hellen Linien höchstens gleich der halben Wellenlänge des benutzten Lichtes sein darf, wenn die Linien noch als getrennt erkannt werden sollen. Das Ergebnis stimmte vollkommen mit dem Resultat einer gleichzeitig veröffentlichten Arbeit von E. Abbe, „des größten

Meisters in diesem Zweige der Optik", überein, dem Helmholtz jedoch in der Bekanntgabe der theoretischen Begründung durch die Lehre von den Beugungserscheinungen zuvorkam. Helmholtz bemerkte, daß demnach die Anwendung von blauem Licht zur Beleuchtung des mikroskopischen Objekts infolge der kleineren Wellenlänge eine stärkere Vergrößerung gestatte, als bei weißem Lichte zu erreichen sei. Abbe hob die Möglichkeit hervor, noch weiter durch die photographische Aufnahme mikroskopischer Bilder mit Hilfe der kurzwelligen chemisch-wirksamen ultravioletten Strahlen zu gelangen, wodurch die mikroskopische Photographie eine mächtige Anregung erhielt. Hierüber hinaus aber ist eine optische Abbildung durch das Mikroskop nicht mehr erreichbar. Durch Anwendung der sogenannten Dunkelfeldbeleuchtung, bei der nur das von vereinzelten kleinsten Objektteilen im Gesichtsfelde abgebeugte Licht in das Objektiv eintritt, so daß sie sich hell auf dunklem Grunde abheben, ist es indessen H. Siedentopf in Jena gelungen, wenigstens das Vorhandensein solcher Teilchen sichtbar zu machen. Durch sein Ultramikroskop lassen sich noch Teilchen nachweisen, „deren Dimensionen auf sehr kleine Bruchteile der Wellenlänge des Lichts (bis zu 0,004 μ) herabgehen" (M. von Rohr, Die optischen Instrumente. Aus Natur und Geisteswelt. 88. Bändchen. Leipzig 1906. S. 83).

Mit geradezu erstaunlicher Arbeitsfreudigkeit und Schaffenskraft brachte Helmholtz gleichzeitig mit der Herausgabe des Handbuchs der physiologischen Optik noch ein anderes großes Werk als Frucht achtjähriger Studien zu Ende: „Die Lehre von den Tonempfindungen, als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik" (1863). Ähnlich wie er dort die Lehre von den Gesichtsempfindungen in drei Abschnitte teilte, „die Lehre von den Wegen des Lichtes im Auge, von den Empfindungen des Sehnervenapparates und von dem

Verständnis der Gesichtsempfindungen oder von den Gesichtswahrnehmungen“ behandelt er hier in einem physikalischen Teile die Leitung des Schalls im Ohr bis zum Gehörnerven, in einem physiologischen die Erregungen der Nerven selbst und in einem psychologischen die Entstehung der Gehörswahrnehmungen aus den Empfindungen. Die Grundlage der wichtigsten Ergebnisse des Buches bildet eine umfassende Analyse der Klangfarbe. Die Abhängigkeit dieser eigentümlichen Eigenschaft, durch die sich bei gleicher Höhe und Stärke die Töne der verschiedenen musikalischen Instrumente sehr merklich voneinander unterscheiden von den, einen vorwaltenden Grundton begleitenden, Obertönen war bereits 1843 von G. S. Ohm ausgesprochen worden. Seine Behauptung, daß man in jedem Falle Grundton und alle Obertöne auch mit dem Gehör unterscheiden könne, bedurfte indessen einer genaueren Fassung. Helmholtz wies schon in einem populär-wissenschaftlichen Vortrage „Über die physiologischen Ursachen der musikalischen Harmonie“ in Bonn 1857 darauf hin, daß man beim Vorgange des Hörens gewissermaßen zwischen dem leiblichen und geistigen Ohre unterscheiden müsse, nämlich zwischen der Empfindung im Hörnerven, wie sie sich ohne Einmischung geistiger Tätigkeit entwickelt, und der Vorstellung, die wir infolge dieser Empfindung uns bilden. In der Empfindung wird jede zusammengesetzte Tonwelle, die von irgendeinem musikalischen Instrument erzeugt ist, in ihre einzelnen einfachen Wellen zerlegt. Was Fourier als eine mögliche mathematische Darstellungsart jeder Wellenform nachgewiesen hat, ihre Zusammensetzbarkeit aus einer Anzahl einfacher Wellen von verschiedener Länge, das verwandelt das leibliche Ohr durch eine tatsächliche Analyse der es treffenden Tonwellen in eine Wirklichkeit. Da wir aber unsere Sinnesempfindungen nur soweit zu beachten pflegen,

als sie für das Erkennen der äußeren Objekte von Bedeutung sind, so bleiben für unsere bewußte Wahrnehmung die einen Klang zusammensetzenden Töne in der, die verschiedenen Instrumente der Tonerzeugung für jenen Zweck ausreichend charakterisierenden, Klangfarbe latent. Unser geistiges Ohr übt sich, die Eigentümlichkeiten der Töne einer Violine oder Flöte, eines Menschen oder Hundes genau zu unterscheiden; es ist uns aber für das praktische Leben gleichgültig, durch welche Mittel wir diese Unterscheidung vollziehen.

Den Beweis für die Richtigkeit dieser Behauptungen erbrachte Helmholtz durch die von ihm konstruierten Resonatoren, kugelige oder zylindrische, auf einen bekannten Ton abgestimmte Glasgefäße, die mit einer engeren Ansatzöffnung in den Gehörgang eingesetzt werden können, während die weitere Öffnung der Tonquelle zugekehrt ist. Mit ihrer Hilfe vermochte auch ein ungeübter Beobachter aus jedem musikalischen Tone, richtiger Klange, die charakteristischen Obertöne herauszuhören, weil er nun gezwungen war, ihnen seine Aufmerksamkeit zuzuwenden. Sie mußten demnach auch schon vorher vorhanden gewesen sein und den Gehörnerven erregt haben. Zugleich war damit eine objektive, von der Wahrnehmung durch ein Ohr ganz unabhängige Existenz der Obertöne nachgewiesen. Jeder Oberton übt ja eine besondere, nur ihm eigentümlich zukommende Wirkung auf den entsprechenden Resonator aus; wirken kann aber nur etwas, was wirklich da ist.

Die Benutzung der Resonatoren ermöglichte Helmholtz eine ins einzelne gehende Untersuchung des näheren Zusammenhanges zwischen Klangfarbe und Obertönen. Er vermochte eine durchaus physikalische Erklärung für den weichen, für den vollen und prächtigen, für den hohlen, den näselnden, den scharfen und rauhen Charakter eines

Tones zu geben. So sind z. B. bei der näselnden Klarinette nur die ungeradzähligen Obertöne, und zwar in großer Anzahl, beim klangvollen Fortepiano nur die niederen Obertöne etwa bis zum sechsten hinauf in mäßiger Stärke vorhanden. Besonderes Aufsehen erregte die Synthese der Vokalklänge, die unserm Forscher auf Grund seiner Theorie der Klangfarbe gelang. Auf elektrischem Wege setzte er Reihen abgestimmter Stimmgabeln in fortdauernde Schwingungen und machte ihre Töne durch Resonatoren in beliebig abzuändernden Kombinationen hörbar; dann ergab eine gewisse Zusammenfassung von Tönen ein dumpfes U, eine andere O, A, E. Allgemein zeigte sich, daß der besondere Klang jedes Vokals aus der Verstärkung zu erklären ist, die gewisse Obertöne eines gesungenen oder gesprochenen Tones durch die Resonanz der Mundhöhle erfahren.

Die Fähigkeit des Ohres, die zusammengesetzten Schwingungen, von denen es getroffen wird, wieder in ihre Teile zu zerlegen, also die einzelnen einen Klang bildenden Töne zu empfinden und dadurch auch bei gehöriger Aufmerksamkeit wahrnehmbar zu machen, führt Helmholtz vermutungsweise auf das Vorhandensein elastischer Anhängsel der Enden des Gehörnerven im Vorhof und vor allen Dingen auf den Bau des Cortischen Organs in der Schnecke des Ohres zurück; es besteht aus unzähligen, mikroskopisch kleinen Plättchen, „welche wie die Tasten eines Klaviers regelmäßig nebeneinander liegen, an ihrem einen Ende mit den Fasern des Hörnerven in Verbindung stehen, am anderen einer ausgespannten Membran anhängen“. Ist jeder Bogen dieses Organs und jedes jener Anhängselchen, ähnlich den Saiten eines Klaviers, auf einen Ton abgestimmt, so kann das betreffende Gebilde nur schwingen und die zugehörige Nervenfaser nur dann empfinden, wenn dieser Ton erklingt; es muß also „die Gegenwart eines jeden

einzelnen solchen Tones in einem Tongewirr auch stets durch die entsprechende Empfindung angezeigt werden".

Im Anschluß an eine genaue Untersuchung der sogenannten „Schwebungen", abwechselnde Steigerungen und Schwächungen des Tones, die man wahrnimmt, wenn zwei Töne von nur annähernd gleicher Schwingungsdauer gleichzeitig erklingen, wird Helmholtz schließlich durch diese Vorstellung auf eine rein physikalische Erklärung der Konsonanz und Dissonanz geführt, jener eigenartigen Färbung unseres musikalischen Empfindens, in der die Pythagoräer und später Keppler das Geheimnis des ganzen Kosmos beschlossen wähnten. Während „jeder einzelne musikalische Ton für sich im Hörnerven eine gleichmäßig anhaltende Empfindung hervorbringt, stören sich zwei ungleich hohe Töne gegenseitig und zerschneiden sich in einzelne Tonstöße, die im Hörnerven eine diskontinuierliche Erregung hervorbringen, und die dem Ohr ebenso unangenehm sind, wie ähnliche intermittierende und schnell wiederholte Reizungen anderen empfindlichen Organen, z. B. flackerndes, glitzerndes Licht dem Auge, Kratzen mit einer Bürste der Haut. Diese Rauhigkeit des Tones ist der wesentliche Charakter der Dissonanz." „Harmonie und Disharmonie scheiden sich dadurch, daß in der ersteren die Töne nebeneinander so gleichmäßig abfließen, wie jeder einzelne für sich, während in der Disharmonie Unverträglichkeit stattfindet und sie sich gegenseitig in einzelne Stöße zerteilen." Beide treiben und beruhigen „abwechselnd den Fluß der Töne, in dessen unkörperlicher Bewegung das Gemüt ein Bild der Strömung seiner Vorstellungen und Stimmungen anschaut. Ähnlich wie vor der wogenden See fesselt es hier die rhythmisch sich wiederholende und doch immer wechselnde Weise der Bewegung und trägt es mit sich fort. Aber während dort nur mechanische Naturkräfte blind walten, und in der Stimmung

des Anschauenden deshalb schließlich doch der Eindruck des Wüsten überwiegt, folgt in dem musikalischen Kunstwerk die Bewegung den Strömungen der erregten Seele des Künstlers. Bald sanft dahinfließend, bald anmutig hüpfend, bald heftig aufgeregt, von den Naturlauten der Leidenschaft durchzuckt oder gewaltig arbeitend, überträgt der Fluß der Töne in ursprünglicher Lebendigkeit ungeahnte Stimmungen, die der Künstler seiner Seele abgelauscht hat, in die Seele des Hörers, um ihn endlich in den Frieden ewiger Schönheit emporzutragen, zu dessen Verkündern unter den Menschen die Gottheit nur wenige ihrer erwählten Lieblinge geweiht hat."

Wir hören hier Helmholtz aus seinem vollen künstlerischen Empfinden heraussprechen. In wunderbarer Weise verbindet sich in ihm die Fähigkeit und die Neigung zu höchster Abstraktion, wie sie das Suchen nach einer alles Geschehen umfassenden mathematischen Formel offenbart, mit einer seltenen Schärfe der Auffassung der natürlichen Vorgänge, einer ausdauernden Geduld und großer Geschicklichkeit in der experimentellen Ergründung feinster Größenbeziehungen zwischen den beobachtbaren Erscheinungen und zugleich mit tiefem Verständnis für die Art des Künstlers, seinen Gegenstand zu ergreifen und nie erlöschender Begeisterung für die Kunst. Er selbst spielte in seinen jüngeren Jahren viel Klavier unter Bevorzugung klassischer Musik und seine „Lehre von den Tonempfindungen" ruhte nicht nur auf physikalischen und physiologischen Untersuchungen, sondern auch auf einem weitschichtigen Studium der Geschichte und Theorie der Musik. Seine optischen Untersuchungen verstärkten und vertieften ihm das Interesse für die Darbietungen des Malers, wie er das in einem Vortrage „Optisches über Malerei" zum Ausdruck gebracht hat. Homer, Goethe, Byron waren die Freunde seiner Mußestunden; gern be-

suchte er das Theater und in gehobener Geselligkeit des Hauses fand er erwünschte Ausspannung von markverzehrender Arbeit. Wollten solche Mittel zur Herstellung der geistigen Elastizität und Frische nicht mehr zureichen, dann ergriff er den Wanderstab; die Brust ward weit unter den Wundern der Natur, auf denen gleichzeitig das Auge des Forschers sinnend und spürend ruhte. Außerdem brachten solche Reisen Helmholtz in persönliche Berührung mit fast allen bedeutenden Zeitgenossen; er betrachtete „solche Berührung" als „das Interessanteste, was das Leben bieten kann" und sah sehr wohl, wie der geistige Maßstab eines Menschen dadurch verändert wird.

Es wäre merkwürdig, wenn solch universaler Geist die universalste Art der Betrachtung der Dinge, die philosophische, verschmäht hätte, zumal der väterliche Einfluß den Jüngling und heranreifenden Mann kräftig in diese Richtung drängte. In der Tat gebührt Helmholtz unstreitig das Verdienst, der Philosophie, wenn nicht die Achtung, so doch mindestens die Beachtung der Naturforscher wieder zugelenkt zu haben. Die erkenntnistheoretische Frage: Was ist Wahrheit? genauer: Welcher Art ist die Übereinstimmung zwischen unseren Vorstellungen und deren Gegenständen? hat Helmholtz in bewußter Anknüpfung an Kant in die Naturwissenschaft hineingeworfen, und sie ist seitdem hier ständig auf der Tagesordnung geblieben. Schon in seinem Habilitationsvortrag von 1852 hatte er darauf hingewiesen, daß sehr verschiedene Kombinationen farbiger Lichter sowohl wie von Körperfarben auf das Auge genau den gleichen Eindruck machen können; das gleiche Aussehen hängt hier also nur von den physiologischen Gesetzen ihres Zusammenwirkens ab, in den objektiven Verhältnissen ist es nicht begründet. Die Licht- und Farbenempfindungen so gut wie alle Sinnesempfindungen überhaupt sind nur

Zeichen für etwas Bestehendes oder Geschehendes, keineswegs aber Abbilder, die irgendeine Ähnlichkeit mit diesem Etwas besitzen. Sie stehen zu ihm in keiner wesentlich anderen Beziehung als der Name oder der Schriftzug des Namens eines Menschen zu diesem Menschen selbst. Wohl aber benachrichtigt uns die Gleichheit oder Ungleichheit ihrer Erscheinung davon, ob wir es mit denselben oder mit anderen Gegenständen und Eigenschaften der Gegenstände zu tun haben, und die Empfindungen können uns daher das Gesetz des Geschehens abbilden. Denn jedes Naturgesetz sagt aus, daß auf Vorbedingungen, die in gewisser Beziehung gleich sind, immer Folgen eintreten, die in gewisser anderer Beziehung gleich sind. Nur Erfahrung und Übung vermag uns die Deutung der Zeichen zu lehren und damit weiter die Erkenntnis der Gesetze zu vermitteln. Gesetzlichkeit, Größe und Zahl, „kurz das Mathematische, sind der äußeren und inneren Welt gemeinsam, und in diesem kann in der Tat eine volle Übereinstimmung der Vorstellungen mit den abgebildeten Dingen erstrebt werden." Diese Ideen zeigen keine grundsätzliche Abweichung von den Gedankenentwicklungen Kants in der Kritik der reinen Vernunft. Wohl aber tritt eine solche in der beiderseitigen Auffassung der Raumanschauung hervor. Wenn Kant den Raum für eine reine Anschauung a priori erklärt, so meint er damit nicht nur, daß wir vermöge unserer geistigen Eigenart alle Gegenstände im Raum außer uns sehen, sondern auch, daß wir durch jene spezifische Organisation gerade zur Ausbildung der Euklidischen Geometrie genötigt werden, weil nur ihre Grundsätze für uns anschaulich möglich sind. Demgegenüber will Helmholtz zwar den apriorischen Charakter der dreidimensionalen Raumanschauung überhaupt gelten lassen, nicht aber den der geometrischen Axiome; er sucht vielmehr in den Aufsätzen „Über die tatsächlichen Grund-

lagen der Geometrie“ (1868) und „Über den Ursprung und die Bedeutung der geometrischen Axiome“ (1870) den Nachweis zu führen, daß sie nur aus der Erfahrung gewonnen, durch diese also auch wohl widerlegt werden können. Den Ausgangspunkt liefert ihm dabei die Tatsache, daß alle Raummessung ursprünglich auf der Kongruenz beruht, insofern solche Messung die Unveränderlichkeit des Maßes bei Ortsveränderungen, mithin ein bestimmtes physikalisches Verhalten gewisser Naturkörper voraussetzt; er stellt sich die Aufgabe, die allgemeinste analytische Form einer mehrfach ausgedehnten Mannigfaltigkeit zu finden, in der die zur Feststellung der Kongruenz erforderlichen Bewegungen möglich sind. Seine Untersuchungen in dieser Richtung trafen mit denen einer Reihe ausgezeichneter Mathematiker, wie Beltrami, Lobatschewsky, Riemann, zusammen; das Ergebnis der Arbeiten dieser Männer war die Durchführung der sogenannten nichteuklidischen Geometrie.

Mit beredten Worten hat E. du Bois-Reymond den „wunderbaren Gang“ der Entwicklung von Helmholtz in der Adresse der Berliner Akademie zum fünfzigjährigen Doktorjubiläum des Forschers am 2. November 1892 dargestellt. „Sie erscheinen“, sagt er, „zunächst als Zögling der Königlichen militärärztlichen Bildungsanstalten, zu einer praktischen, in vorgeschriebenen Formen aufsteigenden Laufbahn bestimmt. Wie anders sollte es kommen. Schon Ihre Inaugural-Dissertation gab ein Maß ab des von Ihnen zu erwartenden Ungewöhnlichen.“ Dubois nennt nun zunächst die Arbeiten von Helmholtz, die zur Umgestaltung der Physiologie in Physik und Chemie der Organismen beitrugen. Er erwähnt, mit welchem Erstaunen selbst die Helmholtz am nächsten Stehenden in der „berühmten Schrift über die Erhaltung der Kraft ein mächtiges mathematisch-physikalisches Vermögen, ungeschult und doch

in scheinbar vollkommener Schulung", sich entfalten sahen; wie Helmholtz „ganz nebenher . . . die erste befriedigende Erklärung der Sonnenwärme" gab. „Inmitten dieser tiefen theoretischen Forschungen" stellten „Versuche von bis dahin in der Physiologie ungeahnter Schärfe" die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Nervenprinzips fest. Die messende Beobachtung der Sansonschen Bildchen löste das Rätsel der Akkommodation des Auges. Der Augenspiegel eröffnete „in Albrecht von Gräfes Händen der Augenheilkunde neue Wege von unermeßlicher praktischer Wichtigkeit". In der Farbenlehre wurde „Thomas Youngs fast vergessene glückliche Vermutung zu sicherem neuen Leben" von Helmholtz erweckt. In der physiologischen Akustik bewältigte er die uralten Probleme vom Wesen der Konsonanz und Dissonanz und der Natur der Klangfarbe. Eine „Theorie der Wirbelbewegungen" ermutigte „Lord Kelvin zu dem Wagnis seiner Hypothese, daß die Atome der Materie außerordentlich kleine, von Ewigkeit fort und fort sich drehende mannigfach geknotete Wirbelringe seien". „Durch alle diese, die ganze theoretische Naturwissenschaft umfassenden Arbeiten aber zieht sich endlich noch die eingehendste Beschäftigung mit der überall eingreifenden „Elektrizität". Zur Chemie führte die Thermodynamik der chemischen Vorgänge. Neben dem allen gehen die erkenntnistheoretischen Bemühungen einher.

„Doch ist es unmöglich", schließt Dubois diese Aufzählung, „in den uns gesteckten Grenzen ein wirklich entsprechendes Bild von der Welt von Tatsachen und Einsichten, von Beobachtungen, Versuchen und Gedanken zu geben, die Sie, die höchste Analyse wie die feinsten Instrumente mit gleicher Meisterschaft und Leichtigkeit handhabend, mit unerschöpflicher Arbeitskraft zutage gefördert haben. Das von uns Übergangene würde allein hinreichen, einen hervorragenden akademischen Namen zu begründen."

Von den großen Naturforschern, deren Leistungen wir auf diesen Blättern skizziert haben, ist Helmholtz zweifellos der universalste gewesen. Mit unvergleichlichem Scharfblick wußte er überall Keime fruchtbarer neuer Entdeckungen und Gedankenentwicklungen zu finden; aber er verstand es auch, ihnen die lebenweckenden Kräfte zuzuführen, und staunend sah die Mitwelt aus unbeachteten Sämlingen hochragende und breitgewipfelte Stämme emporwachsen. Die Gestaltungskraft, mit der ein Coppernicus, Keppler, Galilei, Newton, Faraday, R. Mayer, zuweilen durch Verbindung scheinbar weit auseinander liegender Gedanken, überraschende Neuschöpfungen hervorbrachten, mag größer gewesen sein, als die von Helmholtz; ihre wissenschaftliche Phantasie — das ist wohl der bezeichnende Ausdruck für das, was sie selbst als Inspiration oder Intuition empfanden und kennzeichneten — war der seinigen überlegen. Aber in der Fähigkeit, den Problemen bis in ihre entferntesten Folgerungen nachzugehen, im wissenschaftlichen Denken wird Helmholtz von keinem unter ihnen übertroffen.

Übrigens wäre der Versuch, eine Rangordnung unter den Männern aufzustellen, die an der Spitze der Wissenschaft ihrer Zeit gestanden haben, ebenso müßig, als es einst die Streitfrage über die überlegene Größe von Goethe oder Schiller war.

Jeder ist hier als Mitarbeiter willkommen, wenn die unbedingte Liebe zur Wahrheit seinem Streben Richtung und Ziel gibt. Die Wissenschaft wird um so unpersönlicher, je höher der Stand ihrer Entwicklung ist. Durch einen gigantischen Aufbau aus irdischem Stoffe wollte das einsprachige Urvolk zu den Göttern emporsteigen, aus Ziegeln einen Turm errichten, dessen „Spitze bis an den Himmel reiche“. Da ward seine Sprache verwirrt; keiner verstand

mehr den anderen, die Zungen trennten sich, und die Völker verstreuten sich über alle Länder; der Turm von Babel zerfiel in Trümmer. Aber das Streben nach den reinen Höhen des Himmels blieb im Menschen bestehen. Führende Denker der geschiedenen Völker legten den Grund zu einem anderen Bau, zur Wissenschaft. Sie ward zum neuen Bindemittel der Menschheit. An die Stelle der Einheit der Sprache trat die Einheitlichkeit des geistigen Strebens. In gemeinsamer wissenschaftlicher Arbeit wurde sich die Menschheit ihrer gemeinsamen höheren Bestimmung bewußt. Hier war es ihr vergönnt, Schöpferkraft zu betätigen und Schöpferfreude zu empfinden und sich dem nie völlig vergessenen göttlichen Urquell ihres Daseins wieder zu nähern. Dem Jünger der Wissenschaft tritt, wie Helmholtz einst ausgeführt hat, „die ganze Gedankenwelt der zivilisierten Menschheit als ein fortlebendes und sich weiter entwickelndes Ganzes entgegen, dessen Lebensdauer der kurzen des einzelnen Individuums gegenüber als ewig erscheint. Er sieht sich mit seinen kleinen Beiträgen zum Aufbau der Wissenschaft in den Dienst einer ewigen heiligen Sache gestellt, mit der er durch enge Bande der Liebe verknüpft ist. Dadurch wird ihm seine Arbeit selbst geheiligt."



Literaturverzeichnis.

Nicolaus Copernicus aus Thorn. Über die Kreisbewegungen der Weltkörper. Übers. u. mit Anm. von Dr. C. L. Menzzer. Thorn 1879. E. Lambeck.

Nicolaus Coppernicus. Leopold Prowe. Berlin. Weidmann 1883.

Wilhelm Förster, Sammlung wissenschaftlicher Vorträge. Berlin. Dümmler 1876.

Dr. E F. Apelt. Johann Kepplers astronomische Weltansicht. Leipzig. Weigel 1849.

Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische, von Galileo Galilei, übers. von Emil Strauß. Leipzig Teubner 1891.

Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend, von Galileo Galilei, übers. von A. von Oettingen. Leipzig. Engelmann (Ostwalds Klassiker Nr. 11, 24, 25).

Isaac Newton und seine physikalischen Prinzipien. Ein Hauptstück aus der Entwicklungsgeschichte der modernen Physik von Prof. Dr. Frd. Rosenberger. Leipzig 1895. Joh. Ambrosius Barth.

Michael Faraday. Experimental-Untersuchungen über Elektrizität Leipzig. Engelmann (Ostwalds Klassiker Nr. 81, 86, 87, 126, 128, 131, 134, 136, 140).

Michael Faradays Leben und Wirken von Silvanus P. Thompson. Übers. von Agathe Schütte und Dr. Heinrich Danneel. Halle a. S. W. Knapp 1900.

J. R. Mayer. Die Mechanik der Wärme in gesammelten Schriften. 2. Aufl. Stuttgart. Cotta 1874.

J. R. Mayer. Die Torricellische Leere und über Auslösung. Stuttgart. Cotta 1876.

E. Dühring. Robert Mayer der Galilei des 19. Jahrh. Eine Einführung in seine Leistungen und Schicksale. Chemnitz. E. Schmeitzner 1880.

Leo Koenigsberger, Hermann von Helmholtz. Braunschweig. Fr. Vieweg und Sohn 1902—1903. 3 Bände.

Hermann von Helmholtz, Vorträge und Reden. Braunschweig. Fr. Vieweg und Sohn 1884. 2 Bände.

Dr. Frd. Rosenberger, die Geschichte der Physik in Grundzügen. Braunschweig. Fr. Vieweg und Sohn. 3 Teile.

Dr. Max Planck, das Prinzip der Erhaltung der Energie. 2. Aufl. Leipzig. B. G. Teubner 1908.



Druck von B. G. Teubner in Dresden.

Die verbreitetsten Pflanzen Deutschlands.

Ein Übungsbuch für den naturwissenschaftlichen Unterricht. Von weil. Dr. O. Wünsche. 5. Auflage, herausgegeben und bearbeitet von B. Schorler. Mit 459 Umrißzeichnungen. In Leinwand geb. M. 2.60.

„Das Büchlein liegt seit dem Jahre 1893 in fünfter Auflage vor, und das entscheidet ohne weiteres über seine Brauchbarkeit, besonders bei dem reichlichen Vorhandensein botanischer Bestimmungsbücher. Auch der Name des früheren Autors O. Wünsche ist ihm eine treffliche Empfehlung. Die Auswahl der Pflanzen ist überall eine durchaus sachgemäße, und die Anzahl der aufgenommenen Arten so reichlich, daß das Buch dem Anfänger gewiß längere Zeit ein guter Führer sein wird. Recht praktisch sind am Schluß des Buches Tabellen zum Bestimmen der Holzgewächse nach dem Laube. — Das auch äußerlich schmucke Büchlein sei bestens empfohlen." (Apotheker-Zeitung.)

Unsere Pflanzen.

Ihre Namenserklärung und ihre Stellung in der Mythologie und im Volksaberglauben. Von Dr. Franz Söhns. 4. Auflage. Mit Buchschmuck von J. V. Cissarz. In Leinwand geb. M. 3.—

„Das in vierter Auflage vorliegende Buch geht den Namen unserer deutschen Pflanzen nach; nicht bloß den versteinerten der Wissenschaft, sondern auch den lebendigen des Volkes, und es ist höchst überraschend, zu erfahren, was da oft für hübsche Geschichten, Vorstellungen, Beziehungen hinter Namen zum Vorschein kommen, die, wie Alraun, Beifuß, Beinwurz, Büngelkraut, Hauhechel, Kellerhals, Unserer lieben Frauen Bettstroh und hundert andere, so oft gedankenlos genannt und — was besonders zu beklagen — gedankenlos auch der lernbegierigen Jugend überliefert werden. All das reiche Leben unserer Altvordern, das sich auf die Pflanzenwelt projiziert und in der Mythologie der Volksmedizin, dem Volksaberglauben, der Pflanzensymbolik einen Ausdruck geschaffen hat, geht also dem Pflanzenfreund verloren. Und doch sind diese Dinge ebenso wissenswert wie die biologischen und systematischen Belehrungen der Botanik. Es war also höchst dankenswert, daß der Verfasser unseres Buches sich eingehend mit diesem Artikel beschäftigt hat, nnd es ist erfreulich, daß sein vortreffliches und liebenswürdiges Buch auch schon in vierter Auflage vorliegt." (Die Propyläen.)

Blütengeheimnisse.

Eine Blütenbiologie in Einzelbildern von Prof. Dr. G. Worgitzky. Mit 47 Abbildungen, Buchschmuck von J. V. Cissarz und einer farbigen Tafel von P. Flanderky. 2., vermehrte Auflage. In Leinwand geb. M. 3.—

„...so wird sich das kleine Werk wie kein anderes zur Belebung des botanischen Unterrichts durch die Beziehung auf Bestäubungseinrichtungen eignen." (Naturwiss. Rundsch.)

„Ein vortreffliches und reizend illustriertes kleines Buch, das allen Freunden der Pflanzenwelt willkommen sein wird. Verfasser gibt in anregender populärer Form tiefen Einblick in die vielgestaltigen Beziehungen, die das geheimnisvolle Triebwerk des organischen Lebens mit den Verhältnissen der Außenwelt verknüpfen." (Gaea.)

Exkursionsflora in Nord- und Mitteldeutschland.

Ein Taschenbuch zum Bestimmen der im Gebiete einheimischen und häufiger kultivierten Gefäßpflanzen für Schüler und Laien von Prof. Dr. K. Kraepelin. 7., verbesserte Auflage. Mit 616 Holzschnitten. In Leinwand geb. M. 4.50.

„.... Der leitende Gedanke des Verfassers, mit obigem Werke ein Hilfsmittel zu liefern, das in den Stand setzt, ohne fremde Hilfe die gesammelten Pflanzen sicher zu bestimmen, hat in den weitesten Kreisen Beifall gefunden. Wir haben uns darüber früher an dieser Stelle schon ausgesprochen, und die rasch aufeinander folgenden Auflagen des Buches beweisen, daß der Verfasser sein Ziel auch wirklich erreicht hat. Wir können das Werk nur nachdrücklich empfehlen." (Gaea.)

„Während der letzten Sommerferien habe ich auf meinen zahlreichen Sammelausflügen nach diesem Buche bestimmt und kann es wohl aussprechen, daß keine der mir bekannten Floren bei dem gleichen geringen Umfang ein so sicheres Auffinden der Pflanzen ermöglicht. Die Holzschnitte, welche in klarer Einfachheit zumeist kritische Formen von Blatt- und Blütenteilen darstellen, sind meisterlich ausgewählt, um den Suchenden zu unterstützen. Ich kann diese handliche Flora jedem Kollegen, der sich eine gute Kenntnis der heimischen Pflanzenwelt erwerben will, aufs wärmste empfehlen." (Sächsische Schulzeitung.)

Einführung in die Biologie

zum Gebrauch an höheren Schulen und zum Selbstunterricht. Von Prof. Dr. K. Kraepelin. 2., verbesserte und erweiterte Auflage. Mit 311 Abbildungen, 5 mehrfarbigen Tafeln und 2 Karten. In Leinwand geb. M. 4.—

„Auf verhältnismäßig engem Raum ist ein weitschichtiger Stoff mit souveräner Beherrschung unter Beschränkung auf das Wesentliche knapp vorgeführt. Jeder wird in diesem Buche mit hohem Genuß und Nutzen lesen und zugeben müssen, daß hier in der Tat ein Schatz kostbarer Gedanken übersichtlich ausgebreitet liegt, von dem der Gebildete mehr, als es heute der Fall zu sein pflegt, mit ins Leben hinausnehmen müßte...."
(Deutsche Literatur-Zeitung.)

Biologisches Praktikum für höhere Schulen.

Von Dr. B. Schmid. Mit 75 Abbildungen und 9 Tafeln. Steif geh. M. 2.—, in Leinwand geb. M. 2.50.

„...Eigene Erfahrungen in der Leitung solcher Übungen haben den Verfasser veranlaßt, in dem vorliegenden Leitfaden eine Auswahl geeigneten Übungsstoffes zusammenzustellen und, unterstützt von recht guten Abbildungen, kurz zu erläutern. Das Buch gliedert sich in einen botanischen und einen zoologischen Teil. Von besonderem Wert ist die sehr reiche Ausstattung des kleinen Leitfadens mit Abbildungen. Den Textillustrationen reihen sich eine Anzahl Tafeln an, die teils Übersichtsbilder über den situs viscerum, teils vergleichende Zusammenstellungen einzelner Organe angeben und so eingefügt sind, daß sie bequem herausgeklappt und neben dem Text benutzt werden können. Das kleine Buch darf als eine recht verdienstliche Arbeit bezeichnet werden." (Monatshefte für den naturwiss. Unterricht.)

Biologisches Skizzenbuch für die Adria.

Von Dr. A. Steuer. Mit 80 Abbildungen und Buchschmuck vom Verfasser. In Leinwand geb. M. 2.—

„...Dieses Büchlein hat ein Gelehrter geschrieben, der bei seinen Forschungen in der Natur sein Herz nicht daheim gelassen hat und dem ein gütiges Geschick eine köstliche Gabe verliehen hat: den echten, deutschen Humor. Dank verdient auch die schöne Ausstattung, die die Firma B. G. Teubner dem Büchlein mit auf den Weg gab; die 80 Abbildungen im Text und der Buchschmuck lassen uns den Autor des Werkchens auch als beachtenswerten Meister des Griffels erkennen. Kurzum ein Büchlein, das man nur weglegen wird, um es recht oft wieder zur Hand zu nehmen."
(Grazer Tagblatt.)

Geologische Wanderungen am Schwäbischen Meere.

Ein methodischer Beitrag zur Heimatkunde. Von Prof. K. G. Volk. Mit 14 Abbildungen. Geh. M. 1.—

Von Überlingen — dem besungenen „deutschen Nizza" — gehen wir aus. Millionen von Schalen, Klappentrümmern und Steinkernen finden wir in einem bestimmten Horizonte an den Gestaden seines gleichnamigen Sees. Aber alle diese Versteinerungen sehen ganz anders aus als die Muscheln und Schnecken des heutigen Bodensees. Meeresmuscheln und Meeresschnecken sind es. Und echte Haifischzähne liegen dazwischen. An der Hand dieser marinen Leitfossilien suchen wir die Ausdehnung des alten Meeresboden festzustellen. Da weitet sich das Bild. Wir befinden uns am Grunde jenes Molasse-Meeres, das sich zwischen Alpen und Jura (bzw. Donau) erstreckte von Genf bis Wien und als breiter Arm die Verbindung herstellte zwischen Mittelmeer und dem „pannonischen Becken" (Ungarn-, Schwarzes- und Kaspisches Meer). „Wie es vordem war", erzählen uns die Sand- und Mergelschichten im Liegenden (Untere Süßwassermolasse). Die spitzigen Schlammschnecken und flachen Tellerschnecken in den Schichten des Hangenden versetzen uns in die Zeit der Zimmet- und Lorbeerbäume, der Mastodon-Elefanten und der dumm-plumpen Schreckenstiere (Obere Süßwassermolasse). Auf der Suche nach den Geburtsstätten der „Findlinge", die vor unserer Türschwelle liegen, kommen wir in die Alpen, studieren die Eiszeit von heute, um dann die angestellten Beobachtungen zu übertragen auf die Verhältnisse der großen Eiszeit. Da erfahren wir auch, wer das Land der tausend Hügel, der grünen Matten so fruchtbar machte. Und den Meister, der den Bodenseetrog zimmerte, lernen wir bei der Arbeit kennen. Aber auch dem anderen Künstler, der heute noch modellierend und verändernd an unserem Heimatsrelief schafft, gucken wir in seine Arbeitsstube — dem Wassertropfen.

Digitized by Google

